

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Magisterský studijní program:

strojírenská technologie

Zaměření:

obrábění a montáž

VÝBĚR POVLAKOVANÝCH SLINUTÝCH KARBIDŮ S APLIKACÍ V OBRÁBĚNÍ ŠEDÉ LITINY

THE SELECTION OF COATED CARBIDES FOR APPLICATION IN GREY CAST IRON CUTTING

KOM – 1022

Bc. Jiří Velechovský

Vedoucí práce: Ing. Leoš Holub, CSc.

Konzultant: Jiří Šťastný, F.I.S.M. – produktivní nástroje s.r.o., Liberec

Počet stran:..... 79

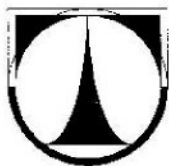
Počet tabulek:..... 13

Počet obrázků:..... 36

Počet příloh:..... 9

Počet modelů nebo jiných příloh:..... -

V Liberci 20.5. 2005



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Studijní rok : 2004 / 2005

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení : **Jiří V E L E C H O V S K Ý**
Magisterský studijní program : N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor a zaměření : 2303T002 Strojírenská technologie
- obrábění a montáž

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Výběr povlakovaných slinutých karbidů s aplikací v obrábění šedé litiny.

Zásady pro vypracování :

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Analýza přínosů povlakovaných SK. Okruhy, provedení, fyzikální a chemická podstata.
2. Průběh opotřebení povlakovaných SK dodaného sortimentu destiček v závislosti na čase. Vše pro danou šedou litinu (422425).
3. Začlenění výsledků experimentů do základního Taylorova vztahu - stanovení průběhu grafů opotřebení a velikosti konstant m.
4. Optimalizační závěry pro danou skupinu povlakovaných SK.
5. Závěry pro aplikace povlakovaných SK v rychlostním a ekologickém obrábění.

VÝBĚR POVLAKOVANÝCH SLINUTÝCH KARBIDŮ S APLIKACÍ V OBRÁBĚNÍ ŠEDÉ LITINY

ANOTACE:

Diplomová práce shrnuje informace o řezných materiálech používaných při obrábění. Dále se zabývá druhy, vlastnostmi a výrobou povlakovaných slinutých karbidů.

V praktické části je sledována závislost opotřebení na čase a stanovení konstant základního Taylorova vztahu pro břitové destičky Sumitomo AC 300G a AC 700G.

THE SELECTION OF COATED CARBIDES FOR APPLICATION IN GREY CAST IRON CUTTING

ANNOTATION:

The diploma work contains informations about the tool materials used in cutting. Next it deals with kinds, properties and production of coated carbides.

The practical part solves the dependence of flank wear width in cutting time and prescribes the constants of elementary Taylors equation of tool materials Sumitomo AC 300G and AC 700G.

Klíčová slova: SLINUTÝ KARBID, OPOTŘEBENÍ, TRVANLIVOST

Desetinné třídění:

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2005

Archivní označení zprávy:

Počet stran: 79

Počet příloh: 9

Počet obrázků: 36

Počet tabulek: 13

Počet diagramů: -

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Mistopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně
s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího a konzultanta.

V Liberci,

.....

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Leoši Holubovi, CSc. za mnoho cenných rad a připomínek v průběhu vypracování diplomové práce. Dále pak p. Jiřímu Šťastnému z firmy F.I.S.M, za poskytnutí břitových destiček a potřebných firemních podkladů.

V neposlední řadě patří poděkování všem mým blízkým, kteří mě podporovali v průběhu celého studia.

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	8
1. Úvod.....	10
2. Řezné materiály a oblasti jejich aplikace.....	11
2.1. Vlastnosti řezných materiálů.....	11
2.2. Přehled řezných materiálů	12
3. Povlakované řezné materiály	14
3.1. Výroba, druhy a vlastnosti podkladového slinutého karbidu	14
3.1.1. Výroba slinutých karbidů	14
3.1.1.1. Druhy slinutých karbidů	16
3.1.2. Vlastnosti slinutých karbidů	16
3.1.2.1. Fyzikální vlastnosti	16
3.1.2.2. Mechanické vlastnosti	17
3.1.2.3. Vliv chemického složení	18
3.1.2.4. Vliv tvaru zrna karbidu wolframu na šíření trhlin	19
3.1.2.5. Strukturně gradientní materiály	20
3.2. Druhy, výroba a vlastnosti povlaků.....	21
3.2.1. Vývoj povlaků řezných materiálů	21
3.2.2. Technologie vytváření povlaků	24
3.2.2.1. Metoda PVD	24
3.2.2.1.1. Napařování	25
3.2.2.1.2. Naprašování	25
3.2.2.1.3. Iontové plátování	26
3.2.2.1.4. PVD povlakování rotačními válcovými elektrodami	28
3.2.2.2. Metoda CVD	29
3.2.2.2.1. Metoda PCVD (Plasma CVD, Mikropulzní plasmatická CVD)	30
3.2.2.2.2. Metoda MTCVD (Středoteplotní CVD)	31
3.2.3. Hodnocení kvality povlaků	32
4. Opotřebení řezných nástrojů.....	34
4.1. Otěr stykových ploch materiálu břitu	35
4.1.1. Abrazivní opotřebení	36
4.1.2. Adhezní opotřebení	36
4.1.3. Difúzní opotřebení.....	38
4.1.4. Oxidační opotřebení	39
4.2. Plastická deformace	40
4.3. Křehký lom	40
4.4. Formy opotřebení slinutého karbidu.....	41
4.5. Časový průběh opotřebení břitu na hřbetě.....	42
5. Trvanlivost řezného nástroje.....	43
5.1. Závislost trvanlivosti na řezných podmínkách.....	44
5.1.1. Parametry ovlivňující hodnotu konstant C_T , C_V , m	47
5.2. Zkoušky trvanlivosti	47

5.2.1. Dlouhodobé zkoušky trvanlivosti	48
5.2.2. Krátkodobé zkoušky trvanlivosti	48
6. Metodika provedených experimentů.....	48
6.1. Příprava experimentu	49
6.1.1. Obrobky – vložené válce	49
6.1.1.1. Měření tvrdosti válců	50
6.1.2. Volba stroje a přípravku	51
6.1.2.1. Volba stroje	51
6.1.2.2. Volba přípravku, upnutí na stroji	51
6.1.3. Břitové destičky Sumitomo AC 300G, AC 700G	52
6.1.3.1. Základní charakteristika	52
6.1.3.2. Struktura destiček a jejich vlastnosti	53
6.1.3.3. Geometrie destiček, upnutí v nástrojovém držáku	54
6.2. Vlastní experiment	55
6.2.1. Řezná rychlost	55
6.2.2. Otáčky	56
6.2.3. Posuv, hloubka řezu	57
6.2.4. Měření opotřebení	57
6.2.4.1. Měřicí zařízení	57
6.3. Vyhodnocení experimentu	58
6.3.1. Postup vyhodnocení výpočtem	58
6.3.1.1. Stanovení trvanlivosti	59
6.3.2. Výpočet regresních koeficientů	59
6.3.3. Testování koeficientů	60
7. Zpracování naměřených hodnot.....	62
7.1. Vyhodnocení destiček AC 300G.....	62
7.1.1. Opotřebení destiček v závislosti na čase	62
7.1.2. Stanovení kritériálního opotřebení	64
7.1.3. Stanovení trvanlivosti	64
7.1.4. Výpočet koeficientů regresní rovnice	65
7.1.4.1. Testování regresních koeficientů	66
7.1.5. Extrapolace řezné rychlosti	67
7.1.6. Výpočet konstant a exponentu Taylorova vztahu	70
7.2. Vyhodnocení destiček AC 700G.....	70
7.2.1. Opotřebení destiček v závislosti na čase	71
7.2.2. Stanovení kritériálního opotřebení	72
7.2.3. Stanovení trvanlivosti	72
7.2.4. Výpočet koeficientů regresní rovnice	72
7.2.4.1. Testování regresních koeficientů	73
7.2.5. Extrapolace řezné rychlosti	73
7.2.6. Výpočet konstant a exponentu Taylorova vztahu	74
8. Porovnání destiček AC 300G, AC 700G.....	74
8.1. Destička AC 300G	74
8.1.1. Optimalizační závěry.....	75
8.1.2. Oblast aplikace – omezení.....	75
8.1.3. Konstanty a exponent Taylorova vztahu	75

8.2. Destička AC 700G	76
8.2.1. Optimalizační závěry.....	76
8.2.2. Oblast aplikace – omezení.....	76
8.2.3. Konstanty a exponent Taylorova vztahu	76
8.3. Řezné prostředí.....	77
9. Závěr	77
<i>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</i>	78
<i>SEZNAM PŘÍLOH</i>	79

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky:	CVD	-	chemické napařování z plynné fáze
	KBN	-	kubický nitrid bóru
	MTCVD	-	středoteplotní CVD metoda napařování
	PCVD	-	mikropulzní plasmatická CVD metoda napařování
	PM	-	prášková metalurgie
	PSK	-	povlakované slinuté karbidy
	PVD	-	fyzikální napařování
	RO	-	rychlořezná ocel
	ŘK	-	řezná keramika
	SK	-	slinuté karbidy

Symbols:	a	-	koeficient lineární regresní rovnice	[-]
	a_p	-	hloubka řezu	[mm]
	b	-	koeficient lineární regresní rovnice	[-]
	C_T	-	konstanta základního Taylorova vztahu	[-]
	C_v	-	konstanta základního Taylorova vztahu	[-]
	C_{vT}	-	konstanta rozšířeného Taylorova vztahu	[-]
	C_{v1}	-	konstanta komplexního Taylorova vztahu	[-]
	D	-	délkový rozměr	[mm]
	d	-	délkový rozměr	[mm]
	F	-	síla	[N]
	f	-	posuv	[mm/ot]
	H_1	-	tvrdost nástrojového materiálu	[HV]
	H_2	-	tvrdost obráběného materiálu	[HV]
	KT	-	opotřebení na čele	[mm]
	k	-	konstanta	[-]
	l	-	délkový rozměr	[mm]
	$L_{(a)1,2}$	-	interval spolehlivosti	[-]
	$L_{(b)1,2}$	-	interval spolehlivosti	[-]
	m	-	exponent Taylorova vztahu	[-]
	n	-	počet otáček	[ot/min]
	n	-	počet měření	[-]
	r	-	poloměr	[mm]
	s	-	délkový rozměr	[mm]
	s_a	-	směrodatná odchylka	[-]

s_b	-	směrodatná odchylka	[-]
$s_{y,x}$	-	směrodatná odchylka	[-]
T	-	trvanlivost	[min]
T_{opt}	-	optimální trvanlivost	[min]
t	-	teplota	[°C]
t	-	čas	[min]
t_A	-	čas dosažení opotřebení	[min]
t_B	-	čas dosažení opotřebení	[min]
t_α	-	kritická hodnota Studentova rozdělení	[-]
VB	-	opotřebení na hřbetě	[mm]
VB_A	-	hodnota opotřebení v čase t_A	[mm]
VB_B	-	hodnota opotřebení v čase t_B	[mm]
VB_k	-	kriteriální opotřebení	[mm]
ν	-	počet stupňů volnosti	[-]
v_{cx}	-	řezná rychlost	[m/min]
v_{opr}	-	průměrná řezná rychlost	[m/min]
VR	-	radiální otupení	[mm]
v_{xteor}	-	teoretická řezná rychlost	[m/min]
v_T	-	řezná rychlost při trvanlivosti T	[m/min]
$\bar{x}$	-	aritmetický průměr	[-]
x_v	-	exponent Taylorova vztahu	[-]
Y_i	-	hodnota z regresní rovnice	[-]
y_v	-	exponent Taylorova vztahu	[-]
z	-	konstanta	[-]
α	-	směrnice přímky	[-]
α	-	hladina významnosti	[-]
α_0	-	ortogonální úhel hřbetu řezného nástroje	[°]
β_0	-	ortogonální úhel břitu řezného nástroje	[°]
γ_0	-	ortogonální úhel čela řezného nástroje	[°]
ε	-	úhel špičky řezného nástroje	[°]
κ_r	-	úhel nastavení hlavního ostří řezného nástroje	[°]
λ_s	-	úhel sklonu ostří řezného nástroje	[°]

1. Úvod

Materiál řezného nástroje a vlastní konstrukční provedení řezného nástroje patří spolu s charakteristikami obráběného materiálu (obrobku) a obráběcího stroje k nejdůležitějším činitelům ovlivňujícím celý proces obrábění.

V současné době používané řezné nástroje procházejí během posledních desetiletí velmi intenzivním vývojem. Vývoj probíhá jednak v oblasti vlastní konstrukce nástrojů, kdy se ustupuje od nástrojů monolitních (celistvých) k použití nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami, tak v oblasti složení vlastního řezného materiálu. Mezi používané řezné materiály patří rychlořezná ocel, slinuté karbidy, cermety, řezná keramika a tzv. supertvrdé materiály, mezi které patří kubický nitrid bóru a syntetický diamant [4].

Nároky na kvalitu a užitnou hodnotu řezných nástrojů se neustále zvyšují, především při obrábění na moderních strojích velmi vysokými řeznými rychlostmi a posuvy. Nejvyšší hodnoty řezných rychlostí jsou dosahovány při tzv. vysokorychlostním obrábění (HSC - High Speed Cutting), konkrétní hodnoty pro vybrané materiály uvádí tab.1.1. [15].

Tab. 1.1. Řezné rychlosti při HSC obrábění podle druhu obráběného materiálu

Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	Ocel	Slitiny Ti	Slitiny Ni	Slitiny Al	Litina	Plasty zpevněné vlákny	Bronz, mosaz
Maximální	1100	1000	280	6000	1600	8000	3000
Minimální	800	150	160	3000	900	2800	1100

S nárůstem řezných a posuvových rychlostí dochází ke značnému zvyšování tepelného a mechanického namáhání břitu řezného nástroje. S tím souvisí požadované vyšší nároky na vlastnosti řezných materiálů, především zvýšená odolnost proti opotřebení, dále snížení tření mezi povrchem břitu řezného nástroje a odcházející třískou, které souvisí s velikostí tepelného zatížení břitu řezného nástroje. Dosažení výše uvedených požadavků je možné docílit vývojem nových, dosud nepoznaných řezných materiálů, nebo zdokonalením technologie výroby těch stávajících, které vede ke zlepšení vlastností a stanovení optimálních pracovních podmínek pro efektivní využití v přesně vymezených oblastech obrábění.

V současné době nejpoužívanější metodou pro zlepšení vlastností řezných materiálů je nanášení povrchových vrstev tvrdých, otěruvzdorných a chemicky stálých povlaků - *povlakování*. Tato metoda se aplikuje na úpravu slinutých karbidů, cermetů, řezné keramiky, v menším měřítku pro kubický nitrid bóru.

Tato diplomová práce se zabývá popisem výroby, fyzikální a chemickou podstatou, druhy a vlastnostmi povlaků a povlakovaných slinutých karbidů. V praktické části je sledováno

opotřebení vybraných druhů povlakovaných slinutých karbidů firmy SUMITOMO ELECTRIC v závislosti na čase a optimalizace pro jejich nasazení při obrábění litiny ČSN 42 24 25 (EN - GJL – 250).

2. Řezné materiály a oblasti jejich aplikace

2.1. Vlastnosti řezných materiálů

Správná volba nástrojového materiálu je důležitým základem ekonomiky obráběcího procesu. Žádný dosud dostupný řezný materiál není schopen zabezpečit komplexní požadavky obrábění, přestože některé moderní materiály často pokrývají velmi širokou oblast aplikace. Důležitou souhrnnou vlastností řezných materiálů určující jejich schopnost ekonomicky a technicky dobře obrábět je řezivost.

Na řezný materiál s ideální řezivostí jsou kladeny následující požadavky [2], [4]:

- vysoká tvrdost a pevnost při pracovních teplotách, zajišťující potřebnou odolnost proti opotřebení a deformaci bříty
- vysoká houževnatost, eliminující křehké porušení bříty
- chemická stálost, zaručující odolnost proti difúzi a oxidaci
- odolnost proti teplotnímu rázu

Podíl a význam jednotlivých požadavků nelze jednoznačně stanovit vzhledem k širokému spektru řezných materiálů, častým vzájemným vazbám a k silnému vlivu okolních podmínek. Např. maximum tvrdosti, které je přibližným měřítkem odolnosti proti popouštění a odolnosti proti opotřebení, a maximum houževnatosti nejsou totožné a vyžadují volbu vhodného kompromisu mezi danými hodnotami vlastností nebo různými nástrojovými materiály. Limitující úlohou je zachování pevnostních vlastností i na úkor řezivosti [2]. Tato skutečnost ovlivňovaná rychle rostoucí cenou a deficitností základních legujících prvků a pokroky v technologii práškové metalurgie předurčila vývoj řezných nástrojů těmito směry:

- 1) Konstrukce skládaných nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami
- 2) Vytváření aktivních vrstev a povlaků na funkčních výměnných elementech i na celých nástrojích – povlakování

2.2. Přehled řezných materiálů

V následujícím textu jsou stručně uvedeny nepoužívanější typy řezných materiálů a jejich vybrané specifické vlastnosti [2], [4]. Slinutými karbidy a povlakovanými slinutými karbidy se podrobněji zabývá kapitola 3.

Rychlořezné oceli (RO)

Rychlořezné oceli jsou slitiny železa s uhlíkem a s 15 až 30 % podílem legujících prvků (W, Mo, Cr, V, Co). Obsah uhlíku se pohybuje v rozmezí 0,8 až 1,3 %, jedná se o oceli ledeburitické. U klasicky vyráběných rychlořezných ocelí jsou možnosti vývoje, zejména zvyšování řezivosti optimalizací chemického složení značně vyčerpány. Aplikace technologie práškové metalurgie zlepšila kvalitu ocelí a umožnila optimalizaci chemického složení. V porovnání s ostatními řeznými materiály mají RO velmi dobrou houževnatost a odolnost proti adheznímu opotřebení. Podstatnou nevýhodou je ztráta pevnostních charakteristik při teplotě blízké 600 °C, řezná rychlost se pohybuje zpravidla pod 60 m.min⁻¹.

Slinuté karbidy (SK)

Slinuté karbidy jsou dvoufázový nebo vícefázový materiál tvořený velmi tvrdými karbidovými částicemi v základní kovové vazbě, připravený technologií práškové metalurgie. Základními karbidy pro výrobu SK a povlakovaných slinutých karbidů (PSK) jsou karbid wolframu WC a kubické karbidy titanu TiC, tantalu TaC a niobu NbC v kobaltovém pojivu.

Vlastnosti SK lze řídit zejména typem a velikostí částic, typem a množstvím pojiva a použitým procesem výroby. V porovnání s RO jsou SK tvrdší a otěruvzdornější, mají větší pevnost v tlaku, ale jsou méně houževnaté. Mají vlivem více než dvojnásobného modulu pružnosti oproti ocelím vyšší tuhost.

Povlakované slinuté karbidy (PSK)

Povlakované slinuté karbidy jsou, jak již bylo výše uvedeno, běžné SK opatřené povrchovými vrstvami tvrdých, otěruvzdorných a chemicky stálých povlaků. Výsledkem je podstatný technický a ekonomický přínos díky výborné kombinaci řezných charakteristik. Povlaky umožňují zvýšit řeznou rychlost o 200 až 300 % a významně rozšířit rozsah použití jednoho druhu SK.

Cermety

Cermet je název pro řezný materiál obsahující tvrdé částice, zpravidla TiC, TiN, TiCN v kovovém pojivu Ni, Mo nebo Co, vyrobený obdobně jako SK práškovou metalurgií. Název zahrnuje počáteční písmena slovního spojení CERamic/METal použitý pro označení keramických částic v kovovém pojivu. Cermety se vyznačují velmi dobrou odolností proti opotřebení čela i hřbetu bříty, vysokou pevností za tepla a chemickou stabilitou. Oproti SK vykazují menší houževnatost a odolnost proti teplotnímu rázu.

Řezná keramika (ŘK)

Řezná keramika je charakterizována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Mezi charakteristické vlastnosti řezné keramiky patří vysoká tvrdost, otěruvzdornost, chemická netečnost, stálost za vysokých teplot, dobré kluzné vlastnosti a odolnost proti mechanickému namáhání.

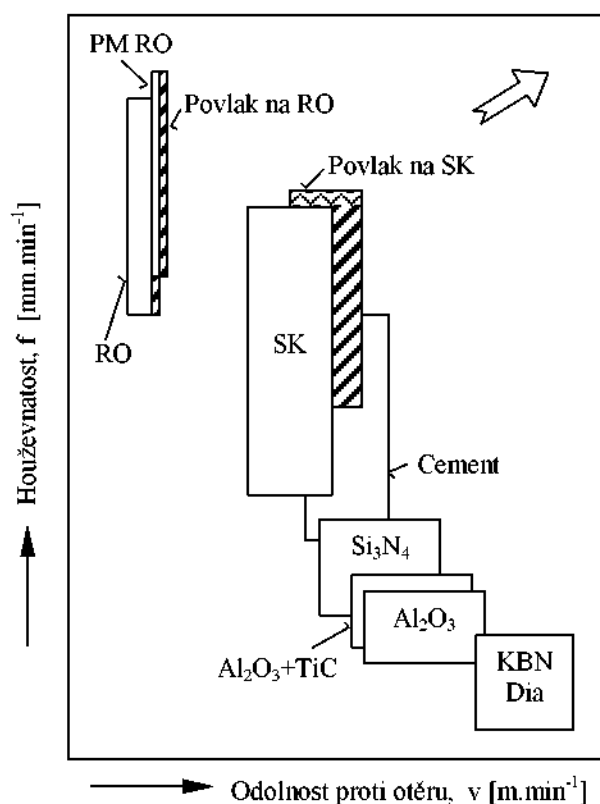
Kubický nitrid bóru (KBN)

Kubický nitrid bóru je synteticky vyrobený materiál, při jehož výrobě se výchozí materiál transformuje do částic a následně se zhutňuje do kompakťů při tlacích 5000 až 6000 MPa a teplotě okolo 1500°C. KBN je po diamantu nejtvrdším řezným materiálem. Vykazuje vysokou tvrdost za tepla (2000°C), vyšší otěruvzdornost než ŘK, ale je velmi křehký (používá se negativní geometrie bříty). Při obrábění kalených materiálů nahrazuje broušení.

Syntetický diamant

Syntetický diamant je nejtvrdším řezným materiálem, který se vyrábí obdobně jako KBN. Kromě vysoké tvrdosti je pro tento materiál charakteristická vysoká odolnost vůči abrazivnímu opotřebení, dobrá tepelná vodivost a nízký koeficient tření. Mezi nevýhody patří křehkost, afinita k železným kovům a niklovým slitinám a nízká pracovní teplota (700°C).

Na obrázku 2.1 jsou porovnány vlastnosti výše uvedených řezných materiálů.



Obr. 2.1. Porovnání vlastností nástrojových materiálů

Z obrázku 2.1 je zřejmé, že nejvyšší řezné rychlosti je možno použít při obrábění pomocí KBN a syntetickým diamantem při vysoké odolnosti proti otěru, naopak při použití houževnatých RO je možné použít velké hodnoty posuvových rychlostí. Ve vztahu k výše uvedenému je zřejmé, že povlakované slinuté karbidy jsou vhodné pro obrábění za středních řezných a posuvových rychlostí a představují řezný materiál s vysokým poměrem houževnatosti a odolnosti proti otěru [5], [6].

3. Povlakované řezné materiály

3.1. Výroba, druhy a vlastnosti podkladového slinutého karbidu

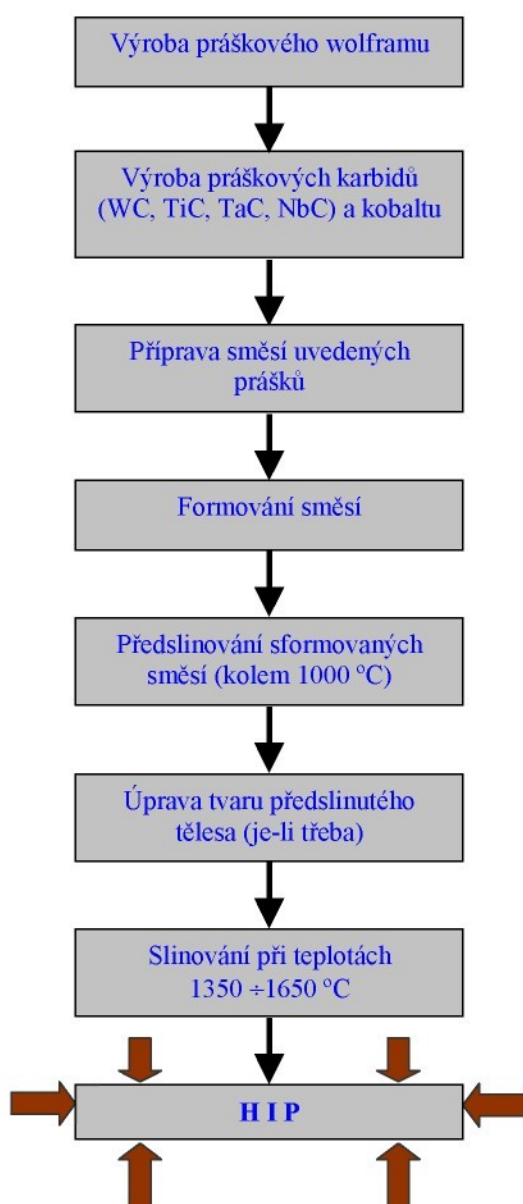
3.1.1. Výroba slinutých karbidů

Výroba slinutých karbidů představuje typickou metodu oboru nazývaného prášková metalurgie, který se zabývá přípravou prášků odpovídajících karbidů a pojících kovů, jejich mísením v patřičných poměrech, lisováním směsi a následným slinováním. Tvrdé, kovům podobné látky, které jsou základem současných slinutých karbidů, jsou tvořeny sloučeninami uhlíku, dusíku, boru a křemíku (karbidy, nitridy, boridy a silicidy) s přechodovými prvky periodické soustavy, zejména těžkovitými kovy – titanem, vanadem, chromem,

zirkonem, niobem, molybdenem, hafniem, tantalem a wolframem. Mezi karbidy má dominující postavení karbid wolframu (WC).

Podstatou procesu výroby slinutých karbidů je lisování směsi prášku tvrdých karbidických částic s práškem pojícího kovu, nejčastěji kobaltu a následné slinování při teplotě blízké bodu tavení pojiva. Tím vzniká kompaktní materiál, jehož tvrdost se blíží tvrdosti výchozích karbidů a který vyniká poměrně vysokou pevností (zejména v tlaku, ohybu), protože jeho struktura je tvořena pevnou kostrou pojícího kovu, která obklopuje zrna relativně křehkých karbidů [2], [4].

Obecný postup výroby slinutých karbidů rozdělený do jednotlivých základních operací je znázorněn na obr. 3.1.



Obr. 3.1. Obecný postup výroby slinutých karbidů

pozn. HIP – Hot Isostatic Pressing, vysokoteplotní izostatické lisování, při kterém probíhá slinování za vysokých teplot a působení tlakového plynu, který zajistí rovnoměrný tlak na slinovaný výrobek ze všech směrů. Takto vyrobené slinuté karbidy mají vysokou hustotu s minimálním objemem pórů a jiných vad, díky čemuž dosahují řezné nástroje nejvyšších hodnot trvanlivosti.

3.1.1.1. Druhy slinutých karbidů

Současné SK pro řezné aplikace jsou na základě svého použití rozdělovány do těchto základních skupin [2], [4]:

- skupina K: složení WC + Co + (TaC.NbC), vhodná pro obrábění materiálů, které dávají krátkou třísku, tj. litiny, případně neželezné materiály
- skupina P: složení WC + TiC + Co + (TaC.NbC), vhodná pro obrábění materiálů, které dávají plynulou třísku, např. oceli
- skupina M: složení WC + TiC + TaC.NbC + Co, vhodná pro obrábění materiálů, které dávají drobivou i plynulou třísku, např. vysokolegované oceli a slitiny

Pro výrobu PSK lze jako podkladové materiály použít SK výše uvedených typů a složení. Je možné připravit podkladový materiál speciálního složení podle požadované aplikace nasazení.

3.1.2. Vlastnosti slinutých karbidů

Slinuté karbidy se skládají z několika složek, přičemž každá složka má různé mechanické i fyzikální vlastnosti. Změnou v procentuálním složení, změnou tvaru a velikosti jednotlivých složek lze vlastnosti vhodně měnit [2], [5].

3.1.2.1. Fyzikální vlastnosti

Hustota

Hustota SK je závislá především na obsahu kobaltu a stupni slinutí. Lisovací tlak nemá zvláštní vliv na hustotu, slinovací teploty i délka slinutí naopak tuto vlastnost silně ovlivňují. U SK s TiC obsahuje tuhý roztok WC – TiC – Co větší množství TiO nebo menší množství TiN, takže hustota není jen měřítkem stupně slinutí, ale i měřítkem jejich čistoty.

Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je spolu s délkovou roztažností nejdůležitější fyzikální vlastností z hlediska odolnosti bříty proti opotřebení. Je závislá především na chemickém složení. Největší vliv má kobalt. Tepelná vodivost WC je podstatně nižší než kobaltu, avšak vyšší než TiC, který vykazuje nejnižší tepelnou vodivost.

Délková roztažnost

Koeficient délkové roztažnosti je u slinutých karbidů v mezích $3,4$ až $6,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, je oproti ocelím poloviční. Největší vliv na roztažnost mají karbidy. Se vzrůstajícím obsahem TiC dochází k nárůstu koeficientu délkové roztažnosti.

Elektrická vodivost

Měrný elektrický odpor se mění se změnou obsahu kobaltu, ale tato změna není výrazná. S rostoucím obsahem TiC měrný odpor klesá.

Magnetické vlastnosti

Magnetické vlastnosti jsou podmíněny přítomností feromagnetické složky – kobaltu. Měřením magnetického sycení lze u SK měřit nejen obsah pojiva, ale prokázat přítomnost nežádoucí η - fáze (klesá magnetické sycení, protože část kobaltu z pojiví fáze přechází do η - fáze, která je nemagnetická). Další magnetická vlastnost, koercitivní síla, je dána stavem napjatosti kobaltové fáze, který závisí na stupni disperze této fáze – koercitivní síla roste s jemností oblasti pojiva. Hodnota koercitivní síly umožňuje stanovit velikost karbidické fáze, protože rozměry oblastí pojiví fáze závisejí též na velikosti zrn WC.

3.1.2.2. Mechanické vlastnosti

Tvrдость

Tvrдость je jednou z hlavních mechanických vlastností. Její velikost závisí zejména na obsahu kobaltu a velikosti zrna karbidické fáze. Nejvyšší tvrдость mají tělesa s jemnozrnnou strukturou a nízkým obsahem kobaltu. Důležitou vlastností je tvrдость za vysokých teplot. S rostoucí teplotou tvrдость rychle klesá (menší intenzitu poklesu vykazují materiály s jemnějším zrnem).

Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu roste s rostoucím obsahem kobaltu, u některých hrubozrnných materiálů může mít maximum při obsahu 16 – 18 % kobaltu a s jeho dalším růstem klesá. Z hlediska velikosti zrna má pevnost v ohybu pro každý obsah kobaltu obvykle maximum při konkrétní zrnitosti, u struktur s velikostí zrna větší i menší její hodnota klesá. S rostoucí teplotou ohybová pevnost klesá, výrazněji u materiálů s nízkým obsahem TiC.

Pevnost v tlaku

Ve srovnání s jinými technickými materiály mají SK mnohem vyšší pevnost v tlaku. Podobně, jako další mechanické vlastnosti, i pevnost v tlaku závisí zejména na obsahu pojiva (klesá s jeho rostoucím obsahem) a velikosti zrna karbidické fáze (vyšší hodnoty vykazují jemnozrnné materiály).

Modul pružnosti v tahu a ve smyku

Slinuté karbidy mají obvykle vysoký modul pružnosti (ve srovnání s RO téměř trojnásobný), s rostoucím obsahem kobaltu jeho hodnota klesá, vyšší hodnoty vykazují materiály s jemnozrnnou strukturou. Hlavním nositelem vysokého modulu pružnosti je WC. S rostoucí teplotou modul pružnosti v tahu mírně klesá. Modul pružnosti ve smyku dosahuje hodnot 170 – 270 GPa.

Lomová houževnatost

Lomová houževnatost je definována jako kritická hodnota součinitele intenzity napětí v okamžiku nestabilního šíření trhliny a je mírou odolnosti tělesa s definovanou trhlinou proti křehkému porušení. Její hodnota roste s narůstajícím obsahem kobaltu a je nejvyšší pro materiály s hrubším zrnem tvrdé fáze WC. Až do teplot 500 – 700 °C zůstává lomová houževnatost konstantní, po překročení těchto hodnot prudce narůstá.

3.1.2.3. Vliv chemického složení

Působení nejdůležitějších komponentů na vlastnosti slinutých karbidů ve smyslu doplnění kapitoly 3.1.2.2 je následující [4], [5]:

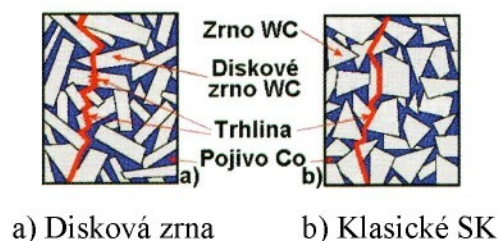
WC – zajišťuje tvrdost za vysokých teplot, odolnost proti otěru a chemickou stálost

- TiC – s rostoucím obsahem se zvyšuje i stálost za vysokých teplot a tvrdost výrazněji než u WC, ale také zvyšuje křehkost, vykazuje nižší pevnost v ohybu a snižuje odolnost proti otěru. Zvětšuje součinitel tepelné roztažnosti a podstatně snižuje tepelnou vodivost, koeficient tření, zlepšuje odolnost proti oxidaci.
- Mo – použití ve spojení TiC – Ni. Tenké povrchové oxidické vrstvy molybdenu snižují koeficient tření, takže kromě ochrany bříty vůči oxidaci usnadňují odchod třísky a brání přenosu nežádoucího tepla z třísky na břit.
- TaC – v porovnání s WC zvyšuje stálost za vysokých teplot, méně příznivě než TiC ovlivňuje mechanické vlastnosti. Příznivě působí proti teplotním rázům, zvyšuje trvanlivost.
- TaC – NbC – potlačuje rekrytalizaci karbidické fáze, zabraňuje růstu zrn, rozšiřuje oblast slinovacích teplot, z čehož plynou rovnoměrnější vlastnosti, zvyšující tvrdost za vyšších teplot a pevnost až o 15 %.
- Co, Ni – jsou nositeli pevnosti a houževnatosti, s růstem obsahu se jejich hodnota zvyšuje.

3.1.2.4. Vliv tvaru zrna karbidu wolframu na šíření trhlin

Únavové trhliny se šíří v materiálech na bázi WC – Co přednostně po hranicích sousedních zrn tvrdé fáze a dále po fázových hranicích zrna – pojivo. S rostoucí velikostí zrna roste střední tloušťka vrstvy kobaltové fáze a klesá rychlost šíření trhlin, protože v houževnatém pojivu se trhliny šíří do větší vzdálenosti. Se vzrůstajícím obsahem kobaltu roste citlivost materiálu na tvoření trhlin, protože se zvyšuje jejich hustota (počet trhlin na jednotku délky), rychlost šíření trhlin klesá.

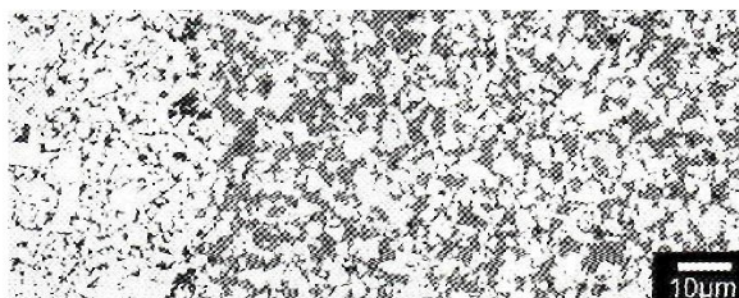
Jiný přístup k šíření trhliny WC představuje na základě výzkumů firma Toshiba Tungaloy. Ta předpokládá rozhodující vliv tvaru zrna WC na šíření trhliny. Pokud struktura obsahuje zrna diskového tvaru, trhlina nemá při určité poloze těchto zrn možnost zrna minout a musí se šířit přes něj, viz obr. 3.1. Zrna mají mnohem vyšší pevnost a zejména tvrdost než pojivo a proto účelně brání šíření trhlin. Celková tvrdost materiálu, vyrobená touto novou technologií DRT (Disk Reinforced technology) je ve srovnání s klasickými materiály mnohem vyšší, protože disková zrna WC mají mnohem větší povrch než zrna jiného tvaru a využívají přednostně roviny zrn, které mají dvakrát vyšší tvrdost než roviny klasických zrn [14].



Obr. 3.1. Šíření trhliny karbidem wolframu [14]

3.1.2.5. Strukturně gradientní materiály

Poměrně novým prvkem v oblasti práškové metalurgie a zejména ve výrobě podkladových slinutých karbidů pro povlakované břitové destičky jsou tzv. strukturně gradientní materiály. Pod tímto pojmem jsou zahrnuty takové materiály, jejichž struktura se v objemu výsledného výrobku mění podle toho, jaké konečné vlastnosti jsou pro danou část destičky rozhodující s ohledem na další technologický postup výroby (především povlakování) a zejména na požadované mechanické a funkční vlastnosti. Řízením technologie slinování lze dosáhnout např. zvýšení pojící fáze (kobaltu) v oblasti ostří destičky (zvýšení odolnosti proti vydrolování) a na povrchu destičky (zvýšení adheze a houževnatosti rozhraní podklad – povlak), zvýšení podílu zrn tvrdých fází v oblasti špičky destičky (zpevnění této nejvíce namáhané části, zvýšení odolnosti proti opotřebení) nebo místní změny koncentrace vybrané tvrdé strukturní fáze (WC, tuhý roztok WC v TiC). Gradientní strukturu mohou mít i samotné povlaky [11], [14]. Na obr. 3.2. je znázorněn strukturně gradientní SK.



Obr. 3.2. Slinutý karbid s gradientní strukturou [14]

3.2. Druhy, výroba a vlastnosti povlaků

Účel výroby deponovaných vrstev, neboli povlaků, na řezných materiálech byl vysvětlen v předcházejících kapitolách. V této kapitole jsou uvedena vývojová stadia jednotlivých druhů povlaků a technologie vytváření povlaků [2], [3], [18].

3.2.1. Vývoj povlaků řezných materiálů

Technologie povlakování materiálů je známa od roku 1890, kdy se využívala pro zvýšení životnosti žhavicího vlákna žárovek výrobou těžkotavitelných karbidů jejich vyloučením z plynné fáze. Technologie vytváření povlaků na řezných nástrojích se rozvíjí od konce 60. let 20. století, kdy byl na trh uveden řezný nástroj, který využíval povlaku s tloušťkou vrstvy $4 \div 5 \text{ } \mu\text{m}$ na bázi TiC. Jako základní (podkladový) materiál byl využit SK. Následovaly povlaky typu TiN, TiCN, Al_2O_3 a další.

Povlakované slinuté karbidy se navzájem liší druhem povlaku, kombinací vrstev, tloušťkou povlaku, metodou povlakování, substrátem atd. Pro konkrétní efektivní aplikaci řezného nástroje s povlakovanou břitovou destičkou (obráběný materiál, řezné podmínky) je velmi důležitá správná kombinace všech uvedených faktorů.

Vývoj povlakovaných slinutých karbidů probíhal v následujících generacích:

I. generace:

- jednovrstvý povlak, téměř výhradně tvořen TiC s tloušťkou vrstvy cca $7 \text{ } \mu\text{m}$, která se vyznačuje velmi špatnou soudržností podkladu a povlaku. Tato špatná soudržnost je způsobena nedokonalou technologií výroby, kdy se mezi podkladem a povlakem tvoří velmi křehká fáze tzv. η – karbid. Při obrábění takovými nástroji rychle dochází k odlupování povlaku, které vede až k znehodnocení nástroje.

II. generace:

- zpravidla jednovrstvý povlak TiC, TiCN, TiN, bez křehkého η – karbidu na rozhraní přechodu podklad – povlak. Zdokonalení technologie výroby umožňuje vytvoření vrstvy povlaků o tloušťce větší než u první generace, a to až $13 \text{ } \mu\text{m}$, bez nebezpečí jejich odlupování při práci nástroje.

III. generace:

- vícevrstvý povlak, který tvoří dvě až tři, případně i více vrstev s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Řazení vrstev odpovídá jejich vlastnostem tak, že jako první jsou na podklad obvykle nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu, které mají ovšem menší odolnost proti opotřebení a jako poslední vrstvy přicházející do kontaktu s odcházející třískou jsou nanášeny vrstvy, které nemusí mít dobrou přilnavost k podkladu, ale vyžaduje se od nich především vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení. Pro názornost je uveden takový povlak na konkrétním příkladě:

- na základní strukturně gradientní materiál (SK) je jako první nanášena vrstva TiCN s vláknitou strukturou, jejímž hlavním úkolem je zvýšit odolnost břitové destičky proti mechanickému opotřebení (vydrolování a vylamování), následuje vrstva Al_2O_3 pro zvýšení odolnosti proti difúznímu a adhezivnímu opotřebení, která zároveň zajišťuje nízkou drsnost povrchu břitové destičky, snižuje její tepelné zatížení a umožňuje její nasazení při vysokých řezných rychlostech. Poslední vrstva TiN snižuje koeficient tření a zvyšuje odolnost proti oxidaci a slouží jako indikátor opotřebení. U moderních povlaků je poslední vrstva tvořena netradičními materiály, jako např. TiCN, ZrCN, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ nebo kompozity $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2/\text{TiO}_x$.

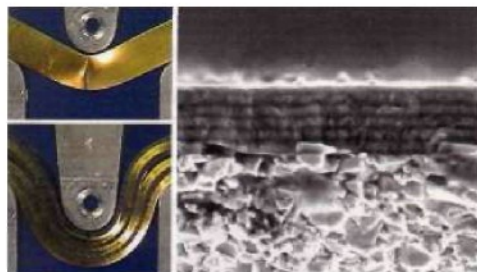
IV. generace:

- speciální vícevrstvý povlak (velmi často i více než 10 vrstev a mezivrstev), s méně či více ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Užívají se stejné materiály jako u třetí generace, k nimž se přidávají tyto následující materiály na bázi: MgO, HfO_2 , SiO_2 , AlCrN atd., jejichž výroba je tvořena cíleným řízením atmosféry v povlakovacím zařízení podle potřeb technologického postupu povlakování.

Mezi další typy moderních vrstev patří tzv. ***lubrikační (kluzné) vrstvy***, jejichž hlavním úkolem je vytváření kluzného povrchu, který výrazně snižuje tepelné zatížení mezi břitem nástroje a odcházející třískou. Kluzné vrstvy vykazují nižší tvrdost než běžné otěruvzdorné vrstvy. Tyto vrstvy se aplikují s tvrdými vrstvami na bázi TiN, TiAlN či TiCN a dále pak tzv. ***DLC vrstvami*** (diamond like carbon = diamantu podobný uhlík) a dále TaC, ZrC, které vhodně kombinují vynikající kluzné vlastnosti s dobrou tvrdostí. Uhlíkové vrstvy mají nízký koeficient tření a sníženou tepelnou odolnost, tvrdost okolo 2000 HV. Nejrozšířenější typy těchto vrstev jsou na bázi MoC_2 a WC/C. V řezných aplikacích vhodně doplňují tvrdou podkladovou vrstvu jako vrstvy kluzné [11].

Vysokou trvanlivost a s ní spojené vysoké úběry obráběného materiálu dosahují břitové destičky tvořené s tzv. **multivrstvými povlaky**, které jsou založeny na principu pravidelného střídání dvou typů vrstev (monovrstev) s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi (TiN – TiCN, TiN – TaN). Tloušťky jednotlivých monovrstev jsou 10 nm a méně. Fyzikální vlastnosti výsledné multivrstvy jsou pak výrazně odlišné od vlastností homogenní monovrstvy stejného průměrného složení. Zásadním způsobem ovlivňují multivrstvy odolnost proti šíření trhlin.

Pokud trhlina vznikne v jednovrstvém povlaku o větší tloušťce, velmi rychle se šíří k podkladovému slinutému karbidu. U multivrstvého povlaku je každé rozhraní vrstev bariérou, které šíření trhliny zcela zabrání nebo jej podstatně zpomalí. Tyto povlaky mají velmi malou drsnost povrchu, a proto výrazně snižují tření mezi odcházející třískou a čelem nástroje, což opět vede k podstatnému snížení množství vzniklého tepla. Nižší teplota znamená, že si povlak zachovává svoji tvrdost, je odolný proti chemickým reakcím, a proto má vyšší trvanlivost. Mezi špičkové aplikace supertenkých multivrstvých povlaků patří povlaky s označením ZX firmy Sumitomo electric, kdy se povlak ZX skládá až z 2000 dvojvrstev TiN – AlN, přičemž je jedna dvojvrstva silná 2,5 nm. Takovýto povlak vyniká výbornými řeznými vlastnostmi, mezi kterými dominuje tvrdost až 4000 HV.



Obr. 3.1. Porovnání vlastností multivrstvy a monovrstvy [11]

Dalšími velmi perspektivními materiály jsou **nanokrystalické kompozity**, založené na termodynamicky řízené segregaci dvou, či vícefázového systému (např. TiN – Si₃N₄), která vytvoří stabilní nanokompozit s jemnozrnnými, rovnoměrně rozptýlenými krystaly velikosti 5 nm a méně, zakotvenými ve vhodné matrici. Výsledný materiál je tvořen dvěma a více složkami, které jsou vzájemně nerozpustné (nemísitelné), přičemž alespoň jedna složka je krystalická a hranice mezi jednotlivými krystaly jsou velmi úzké (pod 1 nm). Protože se jedná o termodynamicky stabilní materiál, nedochází při zvyšování teploty nad 1000°C k růstu zrn. Tvrdost kompozitu je 4000 - 5000 HV, hranice zrn opět slouží jako bariéra proti

šíření trhlin. Mezi nanokompozity s uvedenou největší tvrdostí a vysokou tepelnou stabilitou a chemickou odolností patří vrstvy na bázi Cr-Al-N, resp. Cr-Al-Si-N [14], [18].



Obr. 3.2. Nanokompozitní vrstva (povlak) [14]

Je tedy zřejmé, že se aplikují jak jednovrstvé, tak i vícevrstvé povlaky, jejichž použití je závislé na specifických podmínkách obrábění. Vícevrstvá technologie má velký význam pro optimální kombinaci požadovaných vlastností povlakovaných destiček.

Pokud vzniká požadavek na optimalizaci obráběcích procesů, je možné dosáhnout pomocí povlaků na nástrojích podstatného zvýšení produktivity, kvality i hospodárnosti. Největším přínosem jsou takové povlaky, které mají vysokou míru univerzálnosti použití při práci ve velmi rozdílných podmínkách. Do jisté míry lze za takové povlaky považovat nanokompozitní vrstvy na bázi Ti-Al-Si-N, resp. Ti-Al-N, které pokrývají širokou oblast řezných aplikací s nadprůměrnými přínosy pro produktivitu, hospodárnost a kvalitu obrábění.

3.2.2. Technologie vytváření povlaků

Pro povlakování řezných nástrojů se podle principu používají dvě základní metody, kterými jsou [2], [3]:

- *PVD (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování)*
- *CVD (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování z plynné fáze)*

3.2.2.1. Metoda PVD

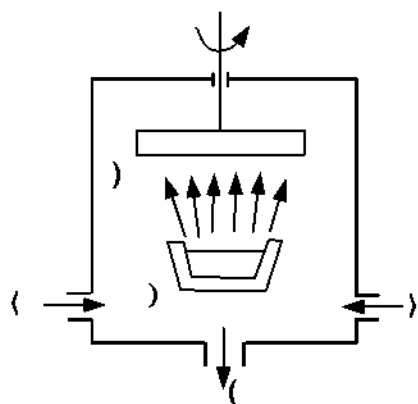
Tato metoda se používá především na povlakování monolitních nástrojů z rychlořezné oceli, neboť je charakteristická nízkými pracovními teplotami (okolo 500 °C), při kterých nedochází k tepelnému ovlivnění nástroje. Dále se tato metoda používá pro *povlakování slinutých karbidů* a cermetů. Fyzikální proces povlakování probíhá ve středním až vysokém vakuu, tj. při tlaku pod 1Pa.

Povlak je možno na nástroji (výměnné řezné destičce) vytvářet:

- 1) Napařováním (odpařováním)
- 2) Naprašováním
- 3) Iontovým plátováním

3.2.2.1.1. Napařování

Při napařování je čistý kov, obvykle Ti, odpařován pomocí elektrického oblouku, svazkem elektronů nebo odporovým ohřevem. Emitované atomární částice reagují s atmosférou komory, kterou tvoří inertní a reaktivní plyn (Ar , N_2) a s tepelnou energií $0,1 - 0,5 \text{ eV}$ dopadají na povrch substrátu (povlakovaného předmětu), kde se usazují ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku (kolem $5 \mu\text{m}$, např. u TiN), pevně adhezně spojeného s podkladem. Princip PVD povlakování napařováním je znázorněn na obr. 3.3.



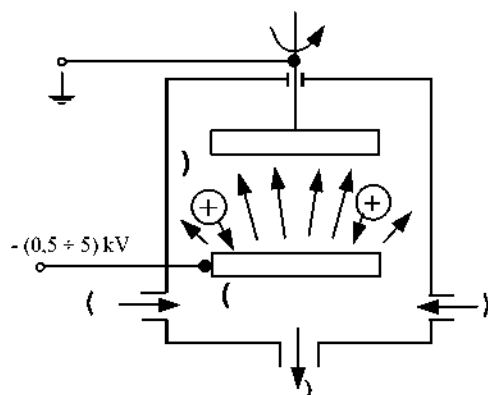
Parametry povlakování: - tlak plynu 10^{-3} Pa
- energie částic $0,1 - 0,5 \text{ eV}$
- podíl iontů 0%

) - odpařovač
(- vývěva
) - substrát
(- inertní plyn (Ar)
) - reaktivní plyn (N_2 , CH_4)

Obr. 3.3. Princip povlakování metodou PVD - napařováním

3.2.2.1.2. Naprašování

Naprašování využívá elektrického výboje v plynné atmosféře komory, při kterém vznikají kationty (kladné ionty), které bombardují katodu z čistého kovu, na níž je připojen záporný pól elektrického napětí $0,5 - 5,0 \text{ kV}$. Vysoká kinetická energie iontů uvolní z terče čistého kovu částice potřebného chemického složení (v závislosti na použitém kovu a složení plynné atmosféry), které se následně usazují na povrchu substrátu a vytvářejí tak požadovaný povlak. Princip PVD povlakování naprašováním je znázorněn na obr. 3.4.



Parametry povlakování: - tlak plynu 1 Pa
 - energie částic 1 – 40 eV
 - podíl iontů < 0,1 %

) - vývěva
 (- terč
) - substrát
 { - inertní plyn (Ar)
 } - reaktivní plyn (N_2 , CH_4)

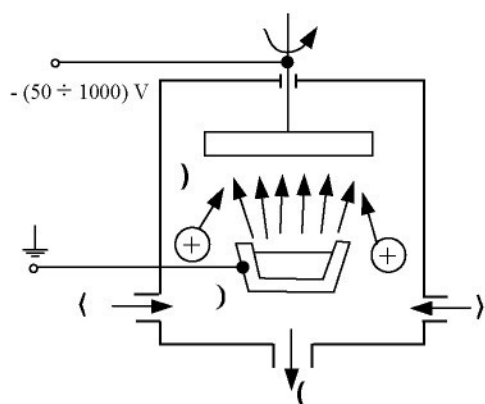
Obr. 3.4. Princip povlakování metodou PVD – naprašováním

3.2.2.1.3. Iontové plátování

Iontové plátování je kombinací napařování a naprašování. Protože je mezi substrátem (katoda, záporný potenciál 50 – 1000V) a odpařovačem vytvořeno silné elektrické pole, dochází k elektrickému výboji v plynné atmosféře, který ionizuje částice plynu i odpařené částice čistého kovu. Reakcí iontů vzniká povlak, který se usazuje na povrchu předmětů vsázky. Pro danou metodu (v menší míře i pro naprašování) je v důsledku plazmaticky aktivovaného procesu charakteristický zvýšený podíl iontů v toku materiálu a s ním spojená vyšší energie částic, což přináší zejména tyto výhody:

- přesně definované chemické složení povlaku
- odstranění kontaminované vrstvy na povrchu substrátu bombardováním částicemi s vysokou energií
- rovnoměrný průběh procesu a s ním spojený dokonalý růst vrstvy povlaku
- vynikající adheze povlaku k podkladu
- vysoká hustota povlaku
- možnost snížení teploty substrátu pod 160 °C
- široký rozsah podkladových a povlakových materiálů (nejčastěji je povlak tvořen vrstvou TiN, další možné vrstvy povlaků jsou např. TiCN, TiAlN, TiZrN, CrAlN atd.)

Princip PVD povlakování iontovým plátováním je znázorněn na obr. 3.5.



Parametry povlakování:

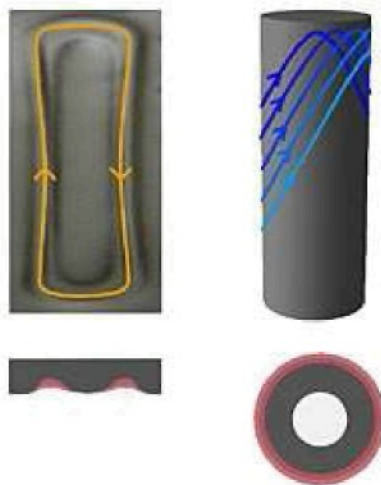
- tlak plynu 1 Pa
- energie částic 50 ÷ 1000 eV
- podíl iontů 20 ÷ 50 %

) - odpařovač
 (- vývěva
) - substrát
 (- inertní plyn (Ar)
) - reaktivní plyn (N_2 , CH_4)

Obr. 3.5. Princip povlakování metodou PVD – iontovým plátováním

K nevýhodám všech výše uvedených PVD metod patří relativně složitý vakuový systém a požadavek pohybovat povlakovanými předměty, aby bylo zaručeno rovnoměrné ukládání povlaku po celém povrchu. Tento požadavek souvisí s tzv. stínovým efektem, který u dané metody způsobuje, že na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařovaných částic se vytváří nedokonalá vrstva povlaku, případně se povlak vůbec nevytvoří. Naopak mezi výhody patří možnost povlakování ostrých hran.

Povlakovací zařízení pro výše uvedené PVD metody jsou vybavena tzv. planárními elektrodami (plochými elektrodami, ve tvaru desek či malých kruhů) viz. obr. 3.6.



Obr. 3.6. Planární a válcová elektroda (target) [18]

Na těchto elektrodách dochází při použití silného magnetického pole k nadměrné a soustředěné erozi a k poměrně rychlému vyřazení z provozu. Silné magnetické pole rovněž redukuje tvorbu makročástic, a tím je výhodné z hlediska vrstev se sníženou drsností.

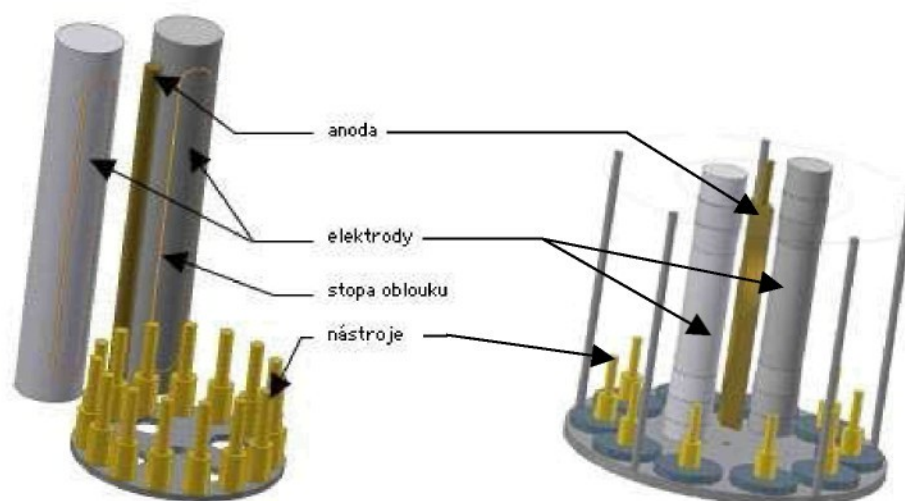
Problém nadměrné eroze lze efektivně vyřešit pomocí rotujících válcových elektrod, jejichž účinná plocha je oproti planárním elektrodám π krát větší. Díky rotaci nedochází ke zmíněné statické erozi a prodlužuje se životnost elektrod. Řešení povlakovacího zařízení s válcovými elektrodami je důležitou podmínkou přípravy nanokompozitních vrstev.

3.2.2.1.4. PVD povlakování rotačními válcovými elektrodami

Technologie povlakování pomocí válcových elektrod jsou založeny na odpařování materiálu pomocí nízkonapěťového oblouku. Nízkonapěťový oblouk je výhodný pro svoji relativně vysokou rychlost odpařování a současnou vysokou ionizaci plazmatu, která přináší možnosti přípravy povlaků a struktur v přírodě se běžně nevyskytujících. Oblouk hoří na povrchu katody v místě tzv. katodové skvrny o průměru řádově 10 μm a dosahuje teploty okolo 15000 $^{\circ}\text{C}$. Za těchto podmínek lze odpařit prakticky každý elektricky vodivý materiál.

Jako zdroj odpařovaného materiálu slouží dvě rotační válcové elektrody, umístěné těsně vedle sebe (jsou v bezprostřední blízkosti povlakovaného předmětu) a umožňují práci s magnetickým polem o vysoké intenzitě. Magnetické pole je vytvářeno kombinací permanentního magnetu a elektromagnetické cívky. Materiál je v důsledku rotace elektrod (targetů) odpařován obloukem z celého jejich povrchu, dochází k rovnoměrné erozi elektrod a zároveň je i obloukem ionizován (atomy materiálu se mění z elektricky neutrálních na atomy s nábojem). Ionizovaný materiál (např. Ti^+ , Ti^{2+}) je urychlován směrem k nástrojům záporným předpětím, které je na ně přiloženo. Cestou ionizuje ještě atomy plynné atmosféry (např. N_2 , Ar). Ionizované atomy po dosažení povrchu nástrojů vytvářejí povrchovými reakcemi vlastní deponovanou vrstvu (povlak).

Tato technologie pracuje s teplotami 400 ÷ 550 $^{\circ}\text{C}$, které jsou nutné pro termodynamicky řízené procesy růstu vrstev. Zmíněná rotace nástrojů vykonávajících planetový pohyb je velmi důležitým parametrem, ovlivňujícím řezný výkon povlaků. Různými hodnotami proudů přiváděných na elektrody a jejich poměry lze měnit stechiometrii, rychlost růstu a částečně i drsnost vrstev bez fyzické výměny elektrod. Synchronizací rychlosti rotace nástrojů ve vztahu k proudům na elektrody lze dosáhnout z hlediska tvrdosti optimalizované tloušťky nanovrstev (nanomultivrstev) cca 5 ÷ 7 nm. Tato technologie umožňuje výrobu jednak nanovrstev tak i strukturně gradientních povlaků.



a) Boční umístění elektrod

b) Centrální umístění elektrod

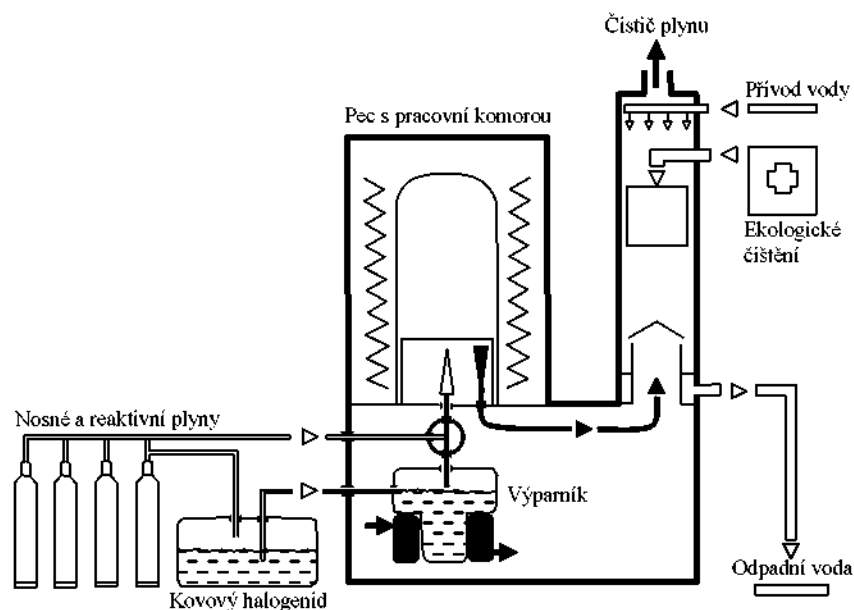
Obr. 3.7. PVD povlakování rotačními válcovými elektrodami [18]

3.2.2.2. Metoda CVD

Chemický proces napařování z plynné fáze je založen na reakci plynných chemických sloučenin v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového materiálu (slinutého karbidu) a následném uložení produktů reakce na tomto povrchu. Proces probíhá při teplotách $700 \div 1500^\circ\text{C}$.

Základním požadavkem je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní, ale přitom prchavou sloučeninu, která se v důsledku přivedení energie (ohřevem, plazmovým obloukem, laserem) chemicky rozkládá (např. kovový halogenid, TiCl_4). Produkty jejího rozkladu jsou pak ukládány na ohřátý povrch povlakovaného předmětu a působí zde jako katalyzátor. Aby proběhla požadovaná reakce (vytvoření vrstvy povlaku), musí být v plynech obsažen i nekovový reaktivní plyn (např. N_2 , NH_4 , CH_4). Poměrně velkým procentem je v přiváděných plynech zastoupen nosný plyn (např. Ar , H_2), který dopravuje danou směs plynů k povlakovanému předmětu, umožňuje řízení celého procesu a výrazně ovlivňuje rychlost růstu vrstvy povlaku. Nosný plyn hraje též důležitou roli při redukci oxidů na povrchu substrátu a tím umožňuje vznik povlaku s dobrou adhezí k podkladu. Může se rovněž účastnit reakce tím, že brání nežádoucím sekundárním reakcím plynové náplně a odstraňuje z ní produkty reakce.

Cíleným řízením obsahu plynné směsi, druhu a množství jednotlivých složek v čase, lze dosáhnout plynulé změny ve složení povlakované vrstvy a vytvářet tak multivrstvé povlaky čtvrté generace. Schéma povlakovacího CVD zařízení firmy Metallwerk Plansee je na následujícím obr. 3.8.



Obr. 3.8. Princip povlakovacího zařízení pro CVD metodu

Mezi hlavní výhody povlakování CVD metodou patří:

- vysoká hustota povlaku
- vynikající adheze k podkladovému materiálu
- povlakování předmětu ze všech stran jako důsledek poměrně vysokých pracovních tlaků plynné směsi (1 – 100 kPa)
- dobrá stechiometrie povlaku

Nevýhodou metody CVD povlakování jsou ve srovnání s PVD metodou vysoké pracovní teploty, které mohou mít nepříznivý vliv na vlastnosti povlakovaného předmětu po absolvování procesu, což omezuje rozsah použití metody. Vysoká pracovní teplota nemá vliv na vlastnosti podkladových slinutých karbidů.

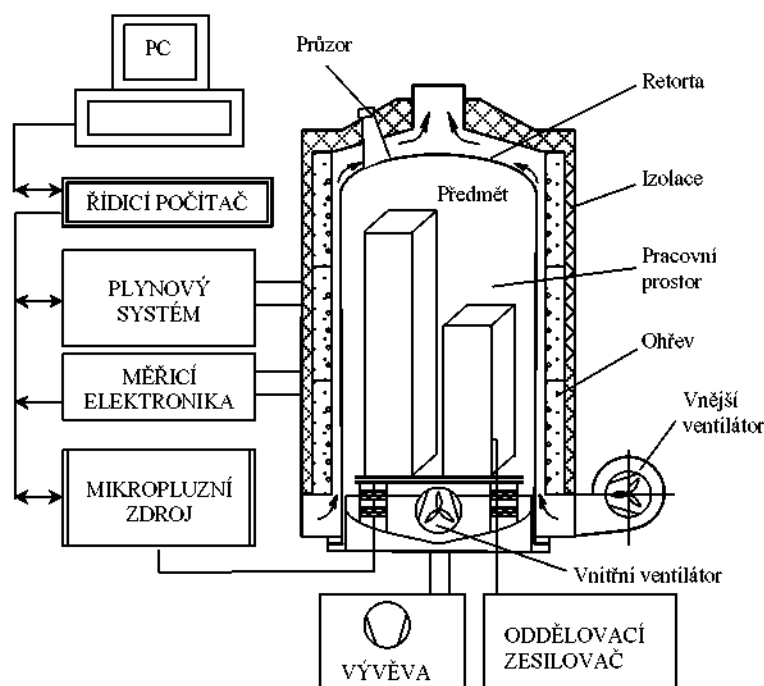
3.2.2.2.1. Metoda PCVD (Plasma CVD, Mikropulzní plasmatická CVD)

Mikropulzní plasmatická CVD metoda se od klasické CVD metody liší nízkými pracovními teplotami (pod 600°C), přičemž princip vytváření povlaku z plynné fáze zůstává zachován. Odpadá zde terč z čistého kovu, který je potřebný pro PVD metodu a v průběhu procesu může povlakovaný předmět zůstat v klidu. Proces povlakování probíhá při tlaku 0,1 ⁻¹kPa, což zjednodušuje vkládání povlakovaných předmětů do pracovní komory a celý vakuový systém. Plazmu lze vygenerovat různými způsoby, které se liší použitým napájecím zdrojem (nízko či vysokofrekvenční střídavé napětí, pulzní stejnosměrné napětí,

stejnosemné napětí). Nejvýhodnější se jeví pulzní stejnosměrné napětí, které zajišťuje vysokou hustotu energie, bez požadavku na dodatečný ohřev povlakovaných předmětů. Metoda umožňuje vytvářet povlaky na bázi TiN, TiCN, TiC, TiAlN, B₄C atd.

Mezi výhody uvedené PCVD metody:

- nízké pracovní teploty (400 – 600 °C)
- čistící účinek iontového bombardování na povrch substrátu před vlastním povlakováním
- jednoduché vkládání povlakovaných předmětů
- možnost vytváření multivrstev v jednom cyklu
- rovnoměrně nanesená povlaková vrstva s vynikající adhezí k podkladu
- vysoký ekonomický efekt
- ekologická nezávadnost



Obr. 3.9. Princip povlakovacího zařízení PCVD (Böhlerit)

3.2.2.2.2. Metoda MTCVD (Středoteplotní CVD)

Midle Temperature Chemikal Vapour Deposition – středoteplotní CVD metoda, je další metodou, která je založena na snížení teplot používaných u CVD povlakování. Tato metoda na rozdíl od klasické CVD metody umožňuje nanášet povlaky z plynné fáze již při teplotách

700 – 850 °C. Zatímco u CVD metody je používán plynný metan (CH_4 – zdroj uhlíku) a čistý dusík, MTCVD využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril nebo metylkyanid.

Mezi výhody MTCVD oproti CVD povlakování je:

- přibližně 3x vyšší růst povlakové vrstvy
- v důsledku nižší teploty nedochází k poklesu houževnatosti podkladového slinutého karbidu vlivem difúze uhlíku z podkladu do povlaku
- nevzniká křehký η - karbid
- břitové destičky jsou odolnější proti mechanickému rázu a mohou být použity při vyšších posuvových rychlostech při přerušovaném řezu
- vytvořené povlaky mají menší drsnost

3.2.3. Hodnocení kvality povlaků

V předcházejících kapitolách bylo pojednáno o základních parametrech a požadavcích na povlaky a podkladové materiály obráběcích nástrojů. Tato kapitola se ve stručnosti zabývá principy hodnocení vybraných vlastností povlaků a podkladových materiálů, které mají nejvyšší vliv na výslednou kvalitu povlakovaného nástroje [18].

Tvrdost

Tvrdost je definována jako odpor materiálu proti pronikání cizího tělesa. Tvrdost podkladového materiálu je měřena zpravidla podle Vickerse s indentorem ve tvaru čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlu 136° . Měření probíhá tak, že se po určitou dobu zvyšuje zátěž až do maximální hodnoty s následným odtižením a odečtením hodnoty, která koresponduje s hloubkou, resp. s velikostí stopy.

Mikrotvrdost

Mikrotvrdost se určuje zejména pro povrchové vrstvy (povlaky). Hlavní rozdíl při měření tvrdosti a mikrotvrdosti spočívá ve volbě velikosti maximální zátěže, kdy při měření mikrotvrdosti dosahuje maximální zátěž v řádu desítek mN. Důvodem použití takto nízkých zátěžných sil je nutnost měření tvrdosti samotné vrstvy bez vlivu materiálu na kterém je vrstva nanесena. Výsledkem měření je nejen výsledné číslo odpovídající mikrotvrdosti materiálu, ale i tvar zatěžovací a odtěžovací křivky, na které je možné rozpoznat nejen nehomogenity a vměstky v různých hloubkách, ale podíl elastické a plastické deformace. Lze měřit mikrotvrdosti vrstev tenkých několik tisícín milimetru.

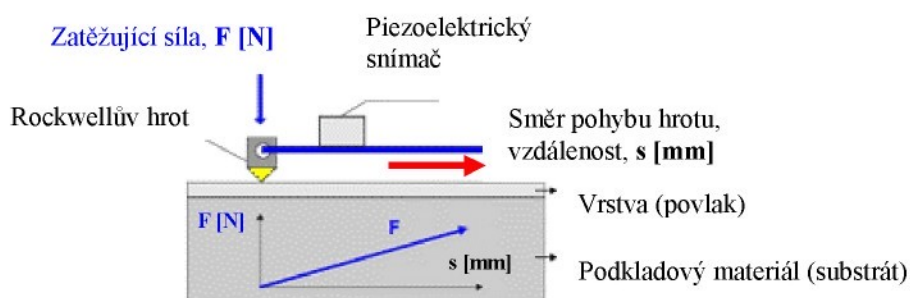
Drsnost

Drsnost je souhrnem nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. V případě povlakování je drsnost způsobená jak vlastním opracováním podkladového materiálu, tak i materiálem, který je deponován na nástroj. Při měření drsnosti se nepočítají vady povrchu, tj. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují jen ojediněle (rysky, trhlinky, důlky apod.) a které vznikají vadami materiálu, poškozením apod.

Z důvodu eliminace vlivu předchozího opracování nástroje se provádí měření drsnosti na speciálně leštěných etalonech jejichž výchozí drsnost R_a je $0,01 \pm 0,02 \mu\text{m}$. Měřená výsledná drsnost není pak ovlivněna opracováním původního nástroje, ale jen vznikající vrstvou.

Adheze

Při měření adheze se vyhodnocuje míra přilnavosti vrstvy povlaku k podkladovému materiálu. Při vyhodnocování se využívá principu postupně se zvyšující zátěžné síly na diamantový Rockwellův hrot při současném posouvání špičky hrotu po měřené vrstvě. S ohledem na běžné velikosti přilnavosti se používá zátěžná síla v rozsahu $20 \div 120 \text{ N}$. Kritická hodnota zátěžné síly, při které dochází k odtržení vrstvy se označuje jako *adheze vrstvy*. Je možné provést závěrečnou kontrolu adheze vrstvy pomocí optického mikroskopu. Pomocí mikroskopu se určí na vzniklé dráze místo, kde došlo k odtržení vrstvy a je odečtena přesná hodnota kritické zátěže. Schéma znázorňující měření adheze je na obr. 3.10.

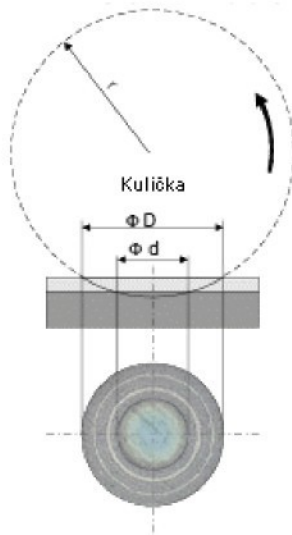


Obr. 3.10. Princip měření adheze vrstvy

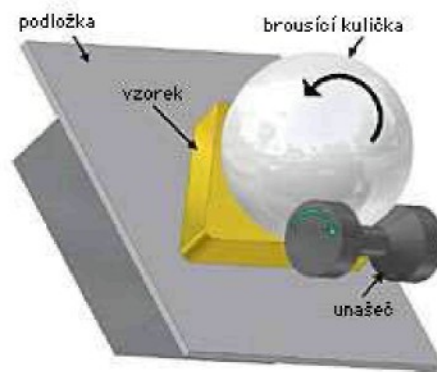
Tloušťka

Pro měření tloušťky vrstvy se využívá zařízení *kalotest* (viz. obr. 3.11.). Princip měření je následující: pomocí otáčející se leštěné kuličky, na kterou se nanese diamantová pasta, dochází k proleštění jak nanesené vrstvy, tak i tenké podpovrchové vrstvy. Ze znalosti

průměru kuličky a mikroskopem změřených průměrů kulových vrchlíků je možné jednoduchým výpočtem stanovit tloušťku nanesené vrstvy. Toto měření je z důvodů vyšší přesnosti vhodné provádět na vyleštěných etalonech.



a) Princíp měření tloušťky vrstvy



b) Schéma měřicího zařízení

Obr. 3.11. Vyhodnocení tloušťky vrstvy [18]

4. Opatření řezných nástrojů

Při obrábění dochází v důsledku řezného procesu k relativnímu pohybu mezi nástrojem a obrobkem a relativnímu pohybu mezi nástrojem a odcházející třískou. Dále dochází ke kontaktu nástroje s obrobkem a odcházející třískou. Výchozí tvar a kvalita pracovních ploch břitu nástroje se postupně mění s objemem odřezávaného materiálu. Zhoršuje se značně drsnost stykových míst břitu s třískou a plochou řezu, mění se geometrie břitu, zvětšuje se poloměr zaoblení ostří. Při tomto kontinuálním procesu dochází k jednomu ze základních jevů souvisejících s obráběním – opotřebení břitu řezného nástroje [2], [8], [9].

K opotřebení břitu řezného nástroje dochází:

- 1) Otěrem stykových ploch materiálu břitu
- 2) Plasticou deformací břitu
- 3) Křehkým lomem břitu

4.1. Otěr stykových ploch materiálu břitu

Opotřebení břitu nástroje otěrem je výsledkem celého komplexu jevů zahrnujících fyzikální a chemické děje, které probíhají ve styčných plochách s obráběným materiálem a které se velmi často prolínají a překrývají.

Při fyzikálním typu opotřebení dochází k porušení povrchu břitu účinkem odcházející třísky a materiálu obrobku v ploše řezu, aniž by se změnilo chemické složení povrchových vrstev SK. Naproti tomu při chemickém typu opotřebení se nejprve ve větší či menší míře mění chemické složení povrchové vrstvy nástrojového materiálu v místě styku třísky s čelem, resp. hřbetem a plochou řezu. Touto změnou se obvykle zhoršují vlastnosti povrchových vrstev nástrojového materiálu a tím i jejich odolnost oproti opotřebení otěrem. Tato defektní povrchová vrstva, která vzniká zpravidla v důsledku oxidace nebo difúze, je snadněji opotřebována částicemi obráběného materiálu. V jiných případech dochází k přímému difúznímu rozpouštění některých strukturních složek.

Děje, vedoucí bezprostředně k opotřebení břitu otěrem lze tedy dále rozdělit podle mechanismu vzniku [8]:

- 1) Fyzikální - abraze
- adheze
- 2) Chemické - difúze
- oxidace

Na celkovém opotřebení se nepodílejí za určitých podmínek všechny děje stejnou intenzitou. Pro určitou dvojici obráběný materiál – nástrojový materiál může podle podmínek obrábění převládat jeden či druhý děj. Jedním z rozhodujících činitelů, určujícím převládající typ opotřebení, je teplota styku nástroje s obrobkem, charakterizovaná nejčastěji střední teplotou řezání. Protože je střední teplota řezání závislá především na řezné rychlosti, je řezná rychlost určující pro převládající mechanismus opotřebení břitu nástroje otěrem.

Při nízkých a středních řezných rychlostech jsou převážně za určitých podmínek převládající fyzikální typy opotřebení, abraze a adheze. Při vyšších a vysokých řezných rychlostech převládají chemické typy opotřebení, oxidace a difúze.

Intenzita fyzikálních typů opotřebení je závislá na poměru tvrdostí nástrojového a obráběného materiálu za podmínek, které existují v kontaktních plochách mezi břitkem nástroje a obráběným materiálem. Na teplotě řezání je závislá jen tehdy, pokud ovlivňuje poměr tvrdosti nástrojového a obráběného materiálu za podmínek, které existují v kontaktních plochách. Naproti tomu je intenzita chemického opotřebení od určité řezné teploty jednoznačně závislá na řezné rychlosti bez ohledu na poměr tvrdostí.

4.1.1. Abrazivní opotřebení

K abrazivnímu opotřebení dochází tím, že tvrdé částice materiálu třísky, popř. povrchu řezu vytvářejí mikrorýhy na stykových místech břitu s třiskou a plochou řezu. Předpokladem ke vzniku abrazivního otěru je, aby tvrdost některých mikročástic materiálu třísky a obrobku převyšovala tvrdost částic materiálu břitu, které jsou hlavními nositeli tvrdosti břitu.

Při obrábění ocelí a litin jsou jako hlavní abrazivní strukturní složky považovány cementit a martenzit. Při obrábění nástroji z povlakovaných slinutých karbidů však nelze opotřebení vysvětlit účinkem výše uvedených složek, protože nástroj obsahuje karbidy (např. Ti, W, Ta, Nb...), které vykazují podstatně vyšší tvrdost (nad 1300 HV) v porovnání s cementitem (cca 800 HV). Abrazivnímu otěru může hrát významnější roli při obrábění legovaných ocelí a litin, které obsahují karbidotvorné legovací prvky, např. Cr, W, Mo a V. Při vyšším obsahu uhlíku se mohou v jejich struktuře vyskytnout volné karbidy těchto prvků, jejichž tvrdost je srovnatelná s tvrdostí strukturních složek povlaků. Sekundárním jevem abrazivního otěru břitu je, že zvyšuje napětí v mezní vrstvě materiálu břitu a tím i pravděpodobnost odtržení jeho částic. Na vzniku tohoto opotřebení se podílí i oxidace [12], [13].

4.1.2. Adhezní opotřebení

Pracovní plochy břitu nejsou ideálně hladké, mají určitou drsnost, a dotýkají se proto s odcházející třiskou pouze ve vrcholcích svých mikronerovností, dochází k bodovému dotyku. Vzájemný styk třísky s čelem a hřbetem za podmínek bodového dotyku nastává při relativně nízkých teplotách řezání. Ve vrcholcích mikronerovností dochází následkem vysokých tlaků k místní plastické deformaci. Působením místní plastické deformace, především v obráběném materiálu, se na vrcholcích mikronerovností obnaží chemicky čistý

materiál, vzrostou místní teploty a vzniknou adhezní spoje – mikroskopické svary (viz. obr. 4.1.).



Obr. 4.1. Vznik adhezního opotřebení [12]

Při relativním pohybu obou ploch probíhá plynulý proces vzniku mikrosvarů a při překročení meze pevnosti ve smyku jednoho z materiálů dochází k odtrhávání mikrosvarů. Nejčastěji se vytrhává materiál obrobku a jeho částice zůstávají nalepeny na čele a hřbetě nástroje. Objem odtržené částice obráběného materiálu obvykle značně převyšuje objem částic odtržených od slinutého karbidu, neboť obráběný materiál má podstatně nižší tvrdost. K porušení povrchu slinutého karbidu dochází obvykle v místech oslabení vlivem nehomogenit struktury, mikropórovitosti, nerovnoměrnosti chemického složení a trhlin.

Na intenzitu adheze a tím i na adhezní opotřebení má vliv tedy především chemická příbuznost materiálů a jejich náchylnost k vytváření adhezních spojů. Dále působí na toto opotřebení řezné prostředí, které podle své chemické aktivity k materiálu obrobku může značně intenzitu adheze snížit tím, že ve stykových místech vytváří v závislosti na svém chemickém složení sloučeniny a tím zabraňuje kovově čistému styku [8].

Dalšími důležitými faktory ovlivňujícími intenzitu adheze jsou řezná rychlost, úhel řezu, velikost a tvar třísky a vzájemný poměr tvrdostí nástrojového materiálu a materiálu obrobku.

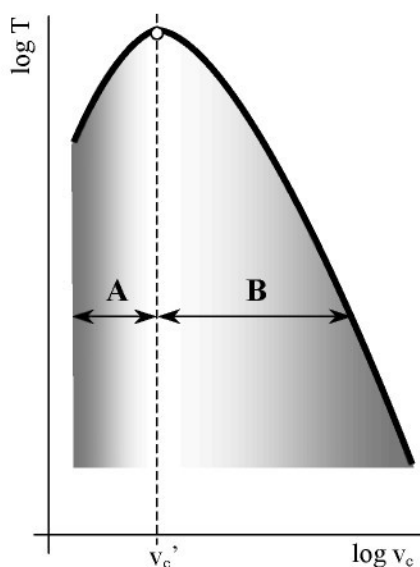
Podle T. N. Loladze lze stanovit trvanlivost bříty při adhezním opotřebení ze vztahu:

$$T \cdot v_c = k \cdot \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^z \quad (1)$$

kde: T je trvanlivost bříty,
 v_c je řezná rychlost,
 k, z jsou konstanty,
 H_1 je tvrdost nástrojového materiálu ve styčné ploše,
 H_2 je tvrdost obráběného materiálu ve styčné ploše

Z tohoto vztahu vyplývá, že při adhezním opotřebení neplatí Taylorův vztah (3), protože pravá strana rovnice je zde závislá na poměru tvrdostí [12], [13].

Na obr. 4.2 znázorňujícím závislost trvanlivosti T na řezné rychlosti v_c v logaritmických souřadnicích je v úseku **A** rostoucí trvanlivosti s řeznou rychlostí možno vyznačit oblast, kde převládá adhezní opotřebení. Trvanlivost roste s řeznou rychlostí až do hodnoty řezné rychlosti v_c' , kde dosahuje trvanlivost maximální hodnoty. Řeznou rychlost v_c' , při které je trvanlivost maximální lze považovat za optimální řeznou rychlost. Po překročení řezné rychlosti v_c' se trvanlivost s rostoucí řeznou rychlostí v oblasti **B** zmenšuje, v procesu opotřebení začíná převládat kvalitativně odlišný typ opotřebení, a to oxidační a difúzní otěr, který je jednoznačně závislý na teplotě. Současne začíná platit Taylorův vztah (3), (4).



Obr. 4.2. Opotřebení v závislosti na řezné rychlosti

Adhezní opotřebení hraje významnou roli zejména při *obrábění litin*, neboť vzniká tříska vykazující minimum plastické deformace. V kontaktní ploše čelo – tříska nedochází ke vzniku vnitřního tření a následkem toho je teplota řezání, která je jedním z rozhodujících parametrů ovlivňujících vznik adhezního opotřebení, nižší. Vznikají tak podmínky pro dotyk ve vrcholcích a vývin tohoto typu opotřebení.

4.1.3. Difúzní opotřebení

Difúzní opotřebení patří do skupiny chemického opotřebení. Dochází k němu při takových řezných podmínkách, při nichž teplota stykových míst bříty dosáhne disociační teploty některého z prvků obrobku nebo řezného nástroje.

Prvky tvořící materiál řezných nástrojů mají disociační teplotu v rozmezí 680 až 1200°C, která se snižuje se zvyšujícím se měrným tlakem a roste v případě, že stykové plochy nejsou kovově čisté. Z toho vyplývá, že se difúzní opotřebení může vyskytnout jen při obrábění nástroji ze slinutých karbidů, keramických materiálů a diamantů. Jakmile překročí při obrábění slinutými karbidy řezná teplota 800 až 900°C, stává se difúze jednotlivých strukturních složek obráběného materiálu a SK převládajícím mechanismem procesu opotřebení čela i hřbetu nástroje (vyměnitelné břitové destičky).

Opotřebení břitu za vysokých teplot nezávisí na poměru tvrdostí nástrojového a obráběného materiálu, nýbrž na teplotě a chemické afinitě, resp. chemické aktivitě materiálu obrobku a SK a na měrném tlaku na stykových místech. Ze SK difundují především C, W, a Co. Z třísky naopak difunduje do povrchových vrstev SK železo.

Difúzní opotřebení nástroje ze SK probíhá dvěma směry. Jednak probíhá plynulé difúzní rozpouštění karbidů v železe γ , jednak narušování a oslabování povrchových vrstev SK, které po určité době způsobí, že se náhle odtrhne celá skupina karbidů. Celkové opotřebení SK je výsledkem obou procesů. Se stoupající řeznou rychlostí roste podíl difúzního rozpouštění strukturních složek SK, kdežto podíl strhávání narušených povrchových vrstev se zmenšuje.

4.1.4. Oxidační opotřebení

Oxidací se označuje vytváření defektní vrstvy na pracovních místech břitu v důsledku jejich oxidace působením vzdušného kyslíku, popř. v důsledku vytváření chemických sloučenin z prvků řezného materiálu a řezného prostředí.

K oxidaci dochází již při nejnižších řezných rychlostech, tj. při nízkých teplotách řezání. Její intenzita se podstatně zvyšuje, přesáhne-li teplota řezání 700°C. U slinutého karbidu zahřátého na vysokou teplotu vede ke vzniku tzv. oxidační rýhy. Prohlubující se oxidační rýha vede k prolomení výmolu, který vzniká na čele difúzním opotřebením směrem na vedlejší hřbet. Tento typ opotřebení je příčinou rychlého zhoršení drsnosti obrobeného povrchu a vede při intenzivních řezných podmínkách k rychlému ukončení trvanlivosti břitu.

Zásadní význam pro potlačení výskytu difúzního a oxidačního opotřebení mají *povlaky na řezných nástrojích*, které slouží jako *účinné bariéry* chránící podkladové materiály před chemickými reakcemi s materiálem obrobku a okolním prostředím.

4.2. Plastická deformace

K opotřebení břitů v důsledku plastické deformace materiálu břitů dochází při obrábění měkkých neadhezních materiálů s malou tepelnou vodivostí, jako jsou např. dřevo, plasty apod. Projevuje se však také za určitých podmínek při obrábění kovů většími řeznými rychlostmi.

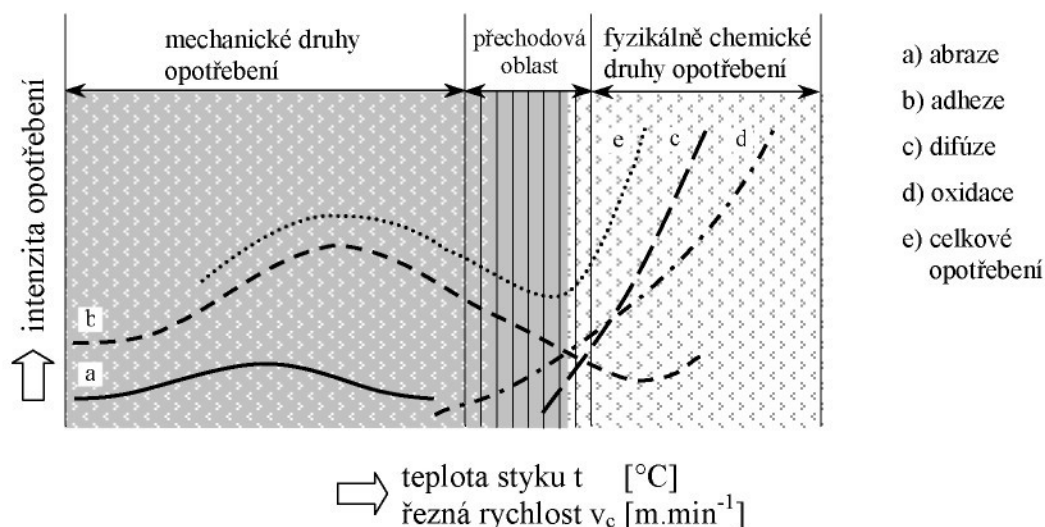
Podstatou této formy opotřebení břitů je kontinuální přesun plasticky deformované vrstvičky materiálu břitů o tloušťce řádově 10^2 nm na stykových plochách břitů. Na čele se posouvá materiál ve směru odchodu třísky, na hřbetě ve směru relativního pohybu hřbetu vůči ploše řezu. Předpokladem pro vznik této formy opotřebení je určitý stupeň plasticity povrchových vrstev materiálu břitů. Významná je koncentrace tepla v nástroji. K plastické deformaci břitů může dojít i u SK, keramických materiálů a diamantu. Malá tepelná vodivost těchto materiálů je příčinou koncentrace tepla v povrchových vrstvách břitů, což spolu se všestranným stlačením zvyšuje jejich plasticitu. Plastická deformace se projevuje postupným zvětšováním poloměru ostří, což vede po dosažení určité velikosti tohoto poloměru k technologickému otupení břitů.

Extrémní formou takového otupení je tzv. *lavinovitý otěr*. Dochází k němu tehdy, když teplota mezní vrstvy materiálu břitů dosahuje kritické hodnoty, při níž se výrazně sníží pevnost materiálu břitů. U nástrojů ze SK je to teplota, při níž se snižuje pevnost kobaltu a povrchové vrstvy intenzivně oxidují.

4.3. Křehký lom

Ke křehkému lomu dochází, překročí-li zatížení břitů na některém jeho místě pevnost materiálu v ohybu.

Příčinou tohoto přetížení může být neúměrně velký průřez odřezávané vrstvy materiálu, ráz při přerušovaném řezu, okamžité zvýšení řezného odporu následkem tvrdého vměstku obrobku, popř. tepelný ráz. Ke vzniku lomů při práci nástroje napomáhají mikrotrhliny v materiálu břitů. Příčinou vzniku mikrotrhlín je velký teplotní spád mezi povrchovou vrstvou a ostatním materiálem nástroje a tím způsobené vnitřní pnutí. Ke křehkým lomům dochází u málo houževnatých materiálů, jako jsou slinuté karbidy, keramické materiály.



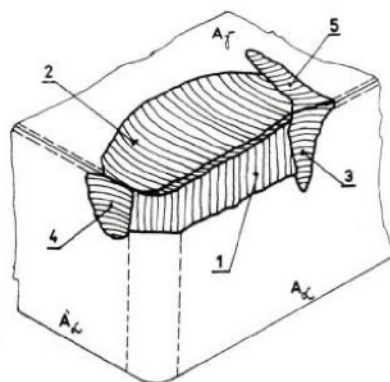
Obr. 4.3. Způsob opotřebení v závislosti na teplotě a řezné rychlosti

Ke všem výše uvedeným základním mechanismům opotřebení nástrojů lze pro doplnění uvést i některé doplňující mechanismy opotřebení, uvedené v přehledu [2]:

- mechanická únava
- tepelná únava
- delaminační opotřebení (odlupování tenkých vrstev z povrchu nástroje, týká se především povlakovaných slinutých karbidů)
- termoelektrické opotřebení (odstraňování elektricky vodivého materiálu z povrchu nástroje)
- rozpouštění nástrojového materiálu (v jednotlivých bodech na povrchu nástroje)
- elektrochemické opotřebení (výměna iontů mezi materiálem nástroje a obrobku)

4.4. Formy opotřebení slinutého karbidu

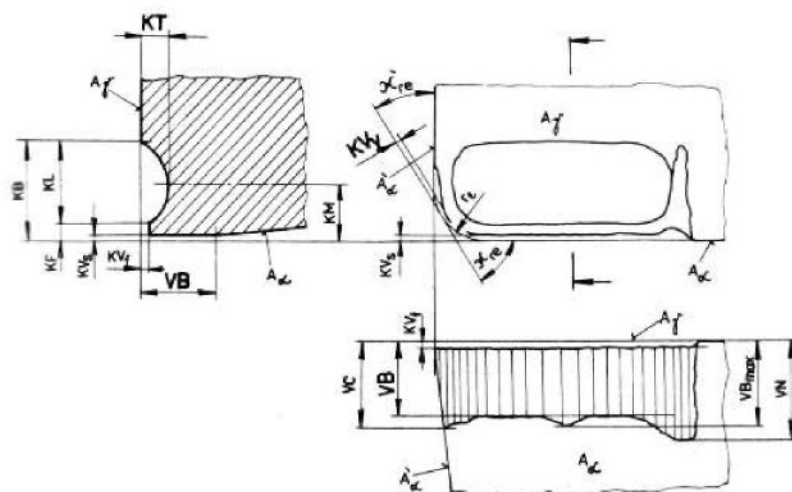
Výše uvedené fyzikálně chemické příčiny opotřebení bříty obráběcího nástroje se projevují různými formami opotřebení (viz. obr 4.4.). Nejdůležitější formou opotřebení bříty je plocha opotřebení na hřbetě, u které se měří průměrná šířka opotřebení na hřbetě VB , resp. VB_c . Další formou charakterizující opotřebení bříty je tvorba žlábků na čele, u které charakterizuje míru opotřebení hloubka žlábků KT .



- 1) Fasetka na hřbetě
- 2) Žlábek na čele
- 3) Primární hřbetní rýha
- 4) Sekundární (oxidační) rýha na hřbetě
- 5) Rýha na čele

Obr. 4.4. Formy opotřebení břitu nástroje – SK [2]

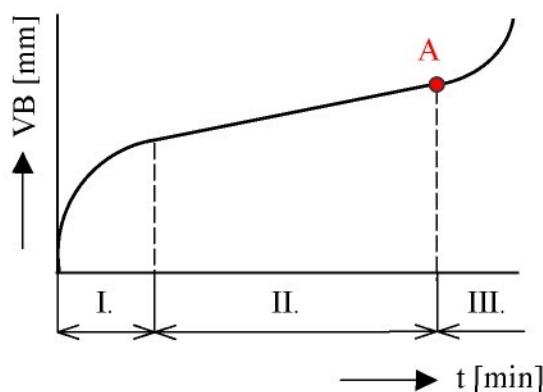
Která forma opotřebení převažuje, závisí na poměrném tepelném a mechanickém zatížení hřbetu i čela břitu. Při obrábění litin, kdy se tvoří krátká lámaná tříska, převažuje opotřebení na hřbetě. Při obrábění houževnatých materiálů, kdy dochází k tvorbě plynulé třísky, převažuje opotřebení na čele.



Obr. 4.5. Hodnocení opotřebení břitu nástroje [2]

4.5. Časový průběh opotřebení břitu na hřbetě

Časový průběh opotřebení břitu závisí především na tepelném zatížení, tj. na velikosti řezné rychlosti, do určité míry také na jeho mechanickém zatížení. Při nižších řezných rychlostech má opotřebení na hřbetě v závislosti na čase průběh rozdělený do tří fází podle obr. 4.6.



Obr. 4.6. Časový průběh opotřebení na hřbetě

V první fázi dochází vlivem velkých tlaků ke zrychlenému opotřebení, ve druhé fázi má opotřebení prakticky lineární průběh a ve fázi třetí dochází zvětšením třecích sil ke zvýšení teploty řezání a intenzita opotřebení silně roste (lavinovitý otěr).

S rostoucí řeznou rychlostí při vyšším tepelném zatížení jsou tyto fáze méně výrazné. Menší vliv než řezná rychlost má na intenzitu opotřebení břitu posuv, nejmenší pak hloubka řezu.

5. Trvanlivost řezného nástroje

Jako trvanlivost břitu se označuje čas, po který nástroj pracuje od svého naostření do otupení. Aby bylo možno určit pro jednotlivé případy obrábění hodnotu trvanlivosti, je třeba definovat stav břitu, kdy jej pokládáme za otupený.

Stav otupení břitu můžeme hodnotit ze dvou hledisek, a to buď z hlediska technologického nebo ekonomického [8], [9].

Z *technologického hlediska* považujeme břit za otupený, není-li nástroj schopen obrábět danou plochu v požadované kvalitě. Toto hledisko se uplatňuje zejména při dokončovacích operacích. Kritériem opotřebení je zde buď velikost tzv. *radiálního otupení* VR , nebo takový stav porušení ostří, kdy již nelze dosáhnout požadované drsnosti obrobené plochy. Pro limitní hodnotu radiálního opotřebení při soustružení platí [7]:

$$VR < \frac{\delta}{2} \text{ [mm]} \quad (2)$$

kde: δ vyjadřuje dovolenou toleranci.

Z *ekonomického hlediska* je optimální otupení břitu největší přípustný otěr jeho hřbetu a čela, při němž je nástroj ještě schopen pracovat. Za maximálně přípustnou velikost otěru

na hřbetě je možno považovat otěr, který odpovídá příslušnému reflexnímu bodu **A** na křivce závislosti $VB = f(t)$ (viz. obr. 4.6).

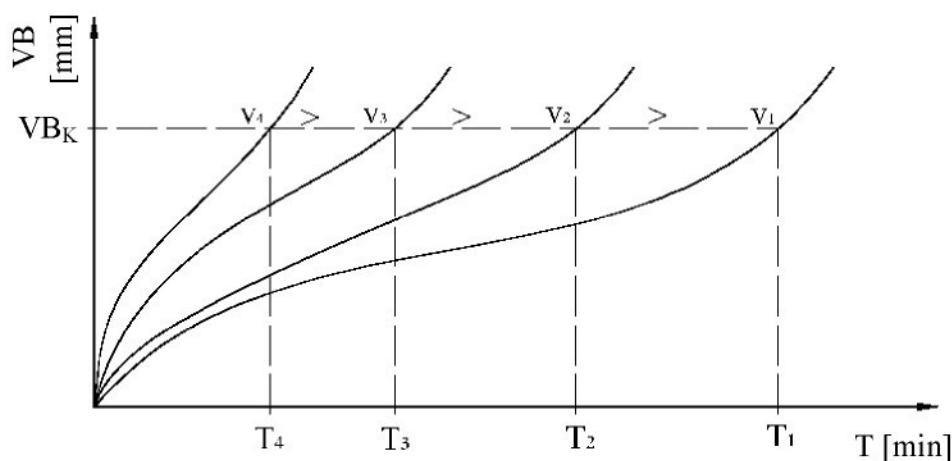
Trvanlivost bříty je tedy jedním ze základních ekonomických parametrů obrábění, a proto je velmi významná její závislost na řezných podmínkách.

5.1. Závislost trvanlivosti na řezných podmínkách

Trvanlivost řezného nástroje, podobně jako jeho opotřebení, závisí zejména na metodě obrábění (soustružení, frézování ...), vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a na řezných podmínkách (řezná rychlost, posuvová rychlost, hloubka řezu, chlazení). Z řezných podmínek ovlivňuje trvanlivost bříty nejvíce řezná rychlost.

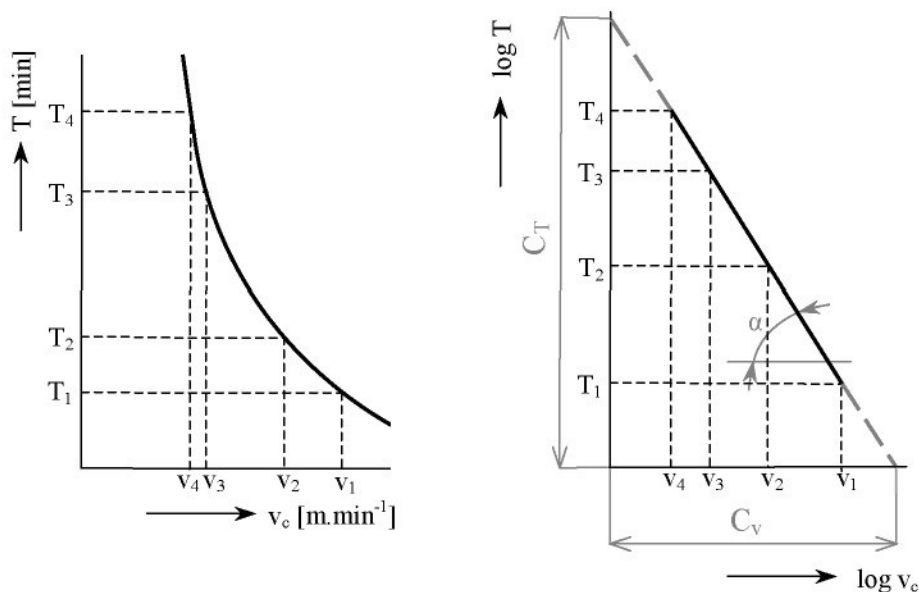
Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ pro konkrétní kombinaci řezný nástroj – obráběný materiál (tzv. Dlouhodobou zkoušku trvanlivosti [2], [7]) lze stanovit následovně:

- obrábí se při několika řezných rychlostech (zpravidla třech nebo čtyřech) za konstantního posuvu a hloubky řezu, přičemž se sleduje časový nárůst opotřebení nástroje (např. VB), který se vynáší do závislosti $VB = f(t)$ (viz. obr. 5.1)



Obr. 5.1. Závislost opotřebení na čase $VB = f(T)$

- pro zvolenou hodnotu kritériálního opotřebení jsou pro jednotlivé trvanlivosti odečteny příslušné hodnoty řezných rychlostí a je stanovena příslušná grafická závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ (viz. obr. 5.2)



a) V normálních souřadnicích

b) V logaritmických souřadnicích

Obr. 5.2. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$

- stanoví se příslušné konstanty C_T , C_v a exponent m (jejich význam viz. níže)

Křivka závislosti $T = f(v_c)$ je v největší části rozsahu řezné rychlosti polytropa (obr. 5.2.a), kterou lze matematicky popsat vztahem:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad [\text{min}] \quad (3)$$

$$\text{resp. : } v_c = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4)$$

kde: m – exponent,

C_T , C_v jsou konstanty

Závislost popsaná matematickým vztahem (3), resp. (4) se nazývá **Taylorův vztah**. Logaritmováním a matematickou úpravou vztahu (3) dostaneme vztah:

$$\log T = -m \cdot \log v_c + \log C_T \quad (5)$$

Vztah (5) vyjadřuje rovnici přímky v logaritmických souřadnicích (viz. obr. 5.2.b), jejíž směrnice vyjadřuje velikost exponentu m , pro který platí:

$$m = \operatorname{tg} \alpha \quad (6)$$

Konstanty C_T , resp. C_V ve vztazích (3) a (4) mohou řádově nabývat hodnot $10^9 \div 10^{13}$, resp. $10^2 \div 10^3$, jejich význam je zřejmý z obr. 5.2.b.

Vliv posuvu f a hloubky řezu a_p na trvanlivost břitu se určuje nepřímo, a to podle jejich vlivu na řeznou rychlost v_T , která odpovídá určité trvanlivosti břitu T . Experimentálně zjištěná závislost mezi řeznou rychlostí při konstantní trvanlivosti, posuvem a hloubkou řezu je vyjádřena vztahem:

$$v_T = \frac{C_{v_T}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (7)$$

kde: x_v , resp. y_v jsou exponenty vyjadřující vliv hloubky řezu, resp. posuvu na otáčku, C_{v_T} je konstanta.

Závislost mezi řeznou rychlostí a trvanlivostí, posuvem a hloubkou řezu se nazývá tzv. *komplexní Taylorův vztah*:

$$v_c = \frac{C_{v1}}{T^{\frac{1}{m}} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (8)$$

kde: x_v , resp. y_v jsou exponenty vyjadřující vliv hloubky řezu, resp. posuvu na otáčku, C_{v1} je konstanta

pozn.: konstanty C_T , C_v , C_{v1} mají rozdílné číselné hodnoty

Při obrábění daného materiálu konstantním posuvem a hloubkou řezu lze vypočítat hodnotu trvanlivosti, změní-li se řezná rychlost anebo hodnotu řezné rychlosti pro změřenou trvanlivost podle vztahu [7]:

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{v_{c1}}{v_c} \right)^m \quad (9)$$

kde: m je exponent,
 v_{c1} je řezná rychlost odpovídající trvanlivosti T_1 ,
 v_c je řezná rychlost odpovídající trvanlivosti T

5.1.1. Parametry ovlivňující hodnotu konstant C_T , C_V , m

Velikost konstant C_T a C_V určuje polohu křivky závislosti $T = f(v_c)$. Zvětšením těchto konstant se křivka posouvá směrem k vyšším rychlostem, tj. určité hodnotě trvanlivosti odpovídá vyšší hodnota řezné rychlosti. Velikost exponentu m určuje velikost změny řezné rychlosti při změně trvanlivosti. Zvyšuje-li se řezná rychlost, snižuje se trvanlivost při malé hodnotě exponentu m pomaleji než při velké hodnotě m .

Velikost exponentu m je závislá především na materiálu břitu, v menší míře na materiálu obrobku, řezné rychlosti a velikosti posuvu. Jeho velikost se pro slinuté karbidy pohybuje v rozmezí $2,5 + 5$.

Obdobně i velikost konstant C_T a C_V závisí na materiálu břitu a obrobku, velikosti posuvu a řezném prostředí. Méně závisí na řezné rychlosti.

Se zvětšující se tloušťkou třísky se hodnota exponentu m a hodnoty konstant C_T a C_V zmenšují. Šířka třísky prakticky hodnotu m neovlivňuje, obdobný je vliv i geometrie břitu na hodnoty m , C_T a C_V . Řezné prostředí, zejména kapaliny s aktivními aditivy, mohou hodnoty m snížit a konstanty C_T a C_V zvýšit.

Materiál obrobku ovlivňuje více hodnoty konstant C_T a C_V , méně hodnotu m . Hodnoty těchto konstant se zmenšují s rostoucí pevností materiálu, zatímco hodnota m se zvětšuje [8].

5.2. Zkoušky trvanlivosti

Závislosti mezi trvanlivostí nástroje a řeznými podmínkami patří mezi nejdůležitější závislosti používané v teorii obrábění [8]. Jsou základním podkladem při řešení praktických problémů optimalizace procesu obrábění. Závislosti mezi trvanlivostí nástroje a řeznými podmínkami se získávají na podkladě experimentálního výzkumu.

Na základě experimentů se zpravidla určují jen závislosti $T = f(v_c)$ a $v_T = f(a_p, f)$. Vliv ostatních parametrů je uváděn jen na základě korekčních součinitelů, jejichž hodnoty lze získat z příslušné odborné literatury [7].

Zkoušky, které vedou ke stanovení uvedených závislostí, lze rozdělit na *dlouhodobé* a *krátkodobé*. Dlouhodobé zkoušky jsou náročné na čas i spotřebu materiálu, ale jsou přesnější a objektivnější. Krátkodobé zkoušky jsou sice méně přesné, ale nižší požadavky na čas a spotřebu materiálu vedou k jejich častějšímu využití.

5.2.1. Dlouhodobé zkoušky trvanlivosti

Postup provedení dlouhodobé zkoušky trvanlivosti je popsán v kap. 5.1, zde jsou uvedeny pouze doporučující informace týkající se stroje, na kterém se tyto zkoušky provádějí.

Při provádění zkoušek se doporučuje použít soustruh vybavený zařízením na plynulou změnu otáček, umožňující zachovávat v průběhu zkoušky konstantní řeznou rychlost při proměnném průřezu obrobku. Pokud takový stroj není k dispozici, užívá se více obrobků stejného průměru, nebo se změna řezné rychlosti udržuje v co nejužším intervalu a nakonec se ke zjištěné trvanlivosti vypočte průměrná řezná rychlost.

5.2.2. Krátkodobé zkoušky trvanlivosti

Cílem krátkodobých zkoušek trvanlivosti je snížení časové a materiálové náročnosti dlouhodobých zkoušek i za cenu snížené přesnosti. To má velký význam především při použití materiálů ze slinutých karbidů a řezné keramiky.

Zkracování zkoušek trvanlivosti se dosahuje např. zvýšením řezných podmínek, snížením hodnoty kritériálního otupení VB_k apod. Výsledky získané krátkodobými zkouškami trvanlivosti jsou odlišné od výsledků získaných zkouškou dlouhodobou.

6. Metodika provedených experimentů

Vlastní experiment spočíval ve stanovení průběhu opotřebení vybraných povlakovaných slinutých karbidů v závislosti na čase – provedení dlouhodobé zkoušky trvanlivosti (viz. kap. 5.1.). Vlastní příprava a provedení experimentů lze shrnout do následujících fází:

I. Příprava experimentu:

- 1) Měření tvrdosti obrobků a rozdělení do skupin dle tvrdosti
- 2) Měření rozměrů obrobků
- 3) Volba stroje a přípravku
- 4) Upnutí obrobku na stroji
- 5) Upnutí nástrojového držáku a zvolené břitové destičky na stroji

II. Vlastní experiment:

- 1) Nastavení řezných parametrů na stroji
- 2) Měření skutečných otáček vřetene stroje a opotřebení

III. Vyhodnocení experimentu:

- 1) Zpracování výsledků – tvorba grafů $VB - T$ a $T - v_c$ závislostí
- 2) Stanovení velikostí konstant C_T , C_v a exponentu m základního Taylorova vztahu

6.1. Příprava experimentu

6.1.1. Obrobky – vložené válce

Zkouška trvanlivosti byla provedena na vložených válcích vyrobených ve firmě AGS Jičín v jedné sérii odstředivým litím do pískové formy. Vložené válce jsou vyrobeny z legované šedé litiny dle ČSN 42 24 25 (EN-GJL-250).

Výrobní výkres vloženého válce je uveden v Příloze I., chemické složení, mechanické vlastnosti, tvrdost a další vlastnosti jsou uvedeny v materiálovém listu (viz. Příloha II.).



Obr. 6.1. Vložený válec

Vzhledem k tomu, že této diplomové práci předcházely diplomové práce jiné, při jejichž řešení byly využívány stejné vložené válce (obr. 6.1.), byl rozsah provedených zkoušek zpracovaných v této práci omezen množstvím válců, které byly k dispozici (celkový počet válců byl 30, ale vzhledem k současnému provádění zkoušek trvanlivosti na řezné keramice mohlo být použito pouze 15 válců). Dalším omezujícím faktorem zkoušek byly nestejně rozměry (průměry) obrobených válců, které znamenaly různé přídavky na obrábění na jednotlivých vzorcích. Rozměry jednotlivých válců jsou uvedeny v Příloze III.



Obr. 6.2. Vložené válce – stav obrobků před zkouškou trvanlivosti

6.1.1.1. Měření tvrdosti válců

Měření tvrdosti bylo provedeno na všech zkušebních vzorcích zkouškou tvrdosti podle Brinella. Na každém vzorku byla provedena celkem 3 kontrolní měření tvrdosti, která se prováděla na průměru válce. Při každém měření byl válec pootočen o 120° vůči poslednímu měření tvrdosti na daném válci. Určující tvrdost každého válce byla stanovena jako aritmetický průměr z třech měření:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (10)$$

kde: n – počet měření

x_i – hodnota příslušná danému měření

$\bar{x}$ - aritmetický průměr

Nejnižší byla naměřená tvrdost 255 HB u válce č. 15, nejvyšší 292 HB u válce č. 23. Válce byly dále rozděleny do 2 skupin tvrdosti, přičemž jako hranice mezi oběma skupinami byla zvolena tvrdost 270 HB. Válce s tvrdostí nižší než 270 HB byly zařazeny do I. skupiny tvrdosti, válce s tvrdostí vyšší do II. skupiny tvrdosti.

Označení válců s příslušnými hodnotami tvrdosti je uvedeno v Příloze III.

Měření tvrdosti bylo provedeno za níže uvedených podmínek:

průměr kuličky (indentoru): 2,5 mm

zatížení: 1840 N

čas měření: 20 s

zařízení: tvrdoměr HPO, Katedra materiálu TU Liberec



Obr. 6.3. Měření tvrdosti vloženého válce na tvrdoměru HPO

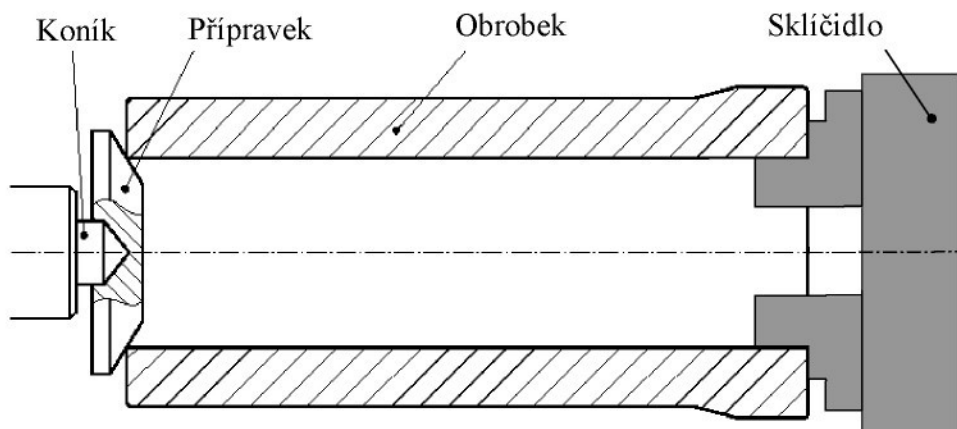
6.1.2. Volba stroje a přípravku

6.1.2.1. Volba stroje

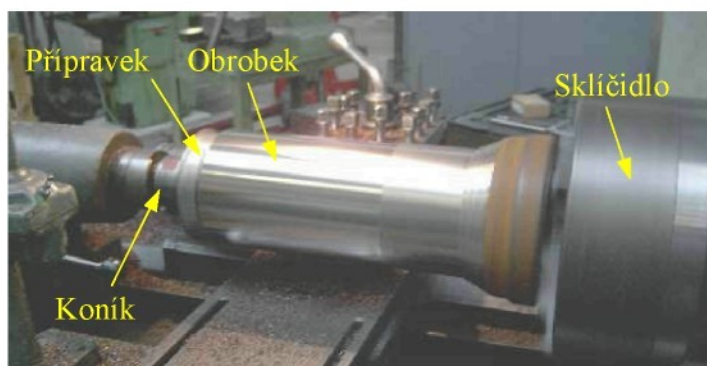
Při volbě vhodného zkušebního zařízení (soustruhu) bylo nutné vycházet z omezeného strojního vybavení laboratoří Katedry obrábění a montáže TU Liberec. Vzhledem k charakteru prováděných zkoušek se jevil jako nejvýhodnější soustruh s plynulou změnou otáček pro zachování konstantní řezné rychlosti, avšak tímto strojem laboratoře vybaveny nejsou, proto byl ze strojového vybavení zvolen soustruh SU 50 (korejské výroby). Na tomto stroji SU 50 byly započaty zkoušky s řeznou destičkou AC 300G (viz. kap. 7.1) a ověřování nastavených parametrů (otáček, posuvů) se skutečností. Při tomto ověřování parametrů stroje bylo zjištěno, že nastavené hodnoty posuvů jsou poloviční oproti skutečným (nepodařilo se zjistit příčinu tohoto stavu). Z tohoto důvodu byly zkoušky přesunuty a provedeny na jiném stroji – SU 50 (české výroby).

6.1.2.2. Volba přípravku, upnutí na stroji

Za nejvýhodnější upnutí vloženého válce na soustruhu SU 50 bylo zvoleno upnutí za vnitřní průměr, z jedné strany válce v universálním sklíčidle a z druhé v přípravku upnutém v hrotu na koníku (viz. obr. 6.4). Strana válce určená pro upnutí v přípravku byla pro dobré ustavení na vnitřním průměru opatřena sražením $4 \times 45^\circ$.



Obr. 6.4. Upnutí obrobku na stroji – schéma



Obr. 6.5. Upnutí obrobku na stroji - provedení

6.1.3. Břitové destičky Sumitomo AC 300G, AC 700G

6.1.3.1. Základní charakteristika

Pro zkoušku trvanlivosti byly zvoleny dva druhy břitových destiček firmy Sumitomo Electric. Jedná se o tyto druhy (označení dle výrobce) [17]:

CNMA 12 04 08 AC 300G

CNMA 12 04 08 AC 700G

V obou případech se jedná o povlakované slinuté karbidy, které představují moderní řezné materiály určené pro obrábění šedé litiny a litiny s kuličkovým grafitem. Složení podkladového (základního) slinutého karbidu obou typů tvoří moderní zirkonem obohacený substrát, který vykazuje extrémně vysokou houževnatost (u destičky AC 700G je tento substrát strukturně gradientní). Na tomto substrátu je metodou CVD povlakování nanесena silná vrstva povlaku tvořeného α - Al_2O_3 , která zabezpečuje vysokou tepelnou odolnost

a ochranu proti abrazivnímu opotřebení a vydrolování ostří při nasazení za vysokých řezných podmínek (vysoké řezné rychlosti, vysoké teplotě řezání).

Břítová destička AC 300G je určena pro plynulé obrábění šedé litiny a litiny s kuličkovým grafitem. Destička AC 700G je určena pro hrubování a přerušovaný řez při obrábění šedé litiny a litiny s kuličkovým grafitem.

Doporučené parametry obrábění [17]:

AC 300G - řezná rychlost: $100 \div 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

- posuv: $0,1 \div 0,6 \text{ mm/ot}$

AC 700G - řezná rychlost: $100 \div 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

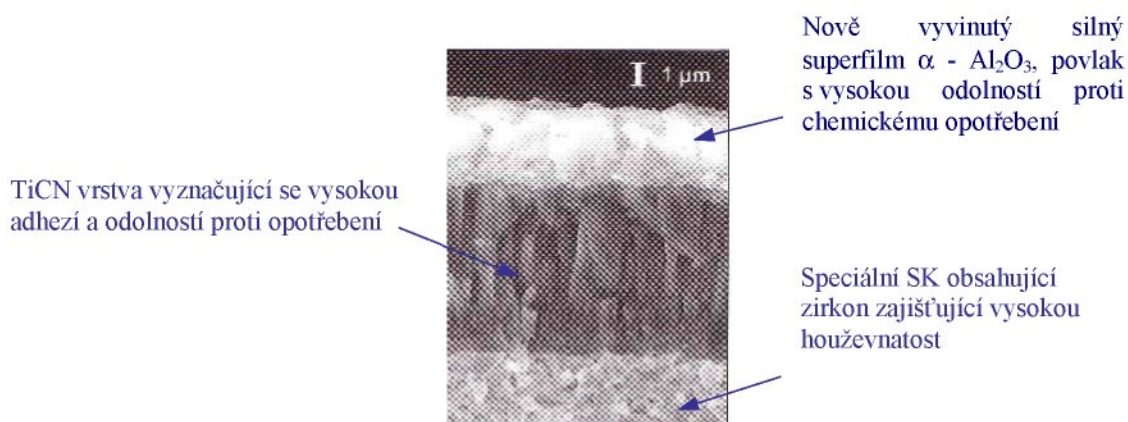
- posuv: $0,1 \div 0,8 \text{ mm/ot}$

6.1.3.2. Struktura destiček a jejich vlastnosti

Mezi hlavní přednosti destiček AC 300G a AC 700G patří [17]:

- nově vyvinutý super film $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ poskytuje zvýšení teplotní odolnosti až o 30 % oproti běžně užívanému Al_2O_3 a až o 150 % větší odolnost proti abrazivnímu opotřebení
- v porovnání s jinými řeznými materiály vykazují tyto destičky při rovnocenných podmínkách obrábění dvojnásobnou životnost
- ideální pro suché obrábění (bez procesních kapalin)

Na obr. 6.6. je znázorněna struktura použitých řezných destiček.

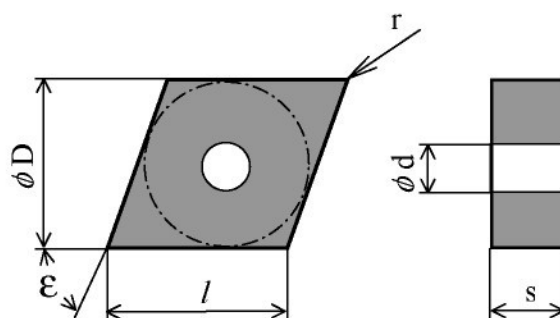


Obr. 6.6. Struktura destiček řady AC 300G, AC 700G [17]

6.1.3.3. Geometrie destiček, upnutí v nástrojovém držáku

Oba druhy zvolených destiček mají shodnou geometrii a proto byl pro jejich upnutí použit stejný nástrojový držák.

V této kapitole jsou přiblíženy pouze základní geometrické charakteristiky použitých destiček a nástrojového držáku. Systémem označování destiček dle ISO se blíže zabývá např. [2], [17].



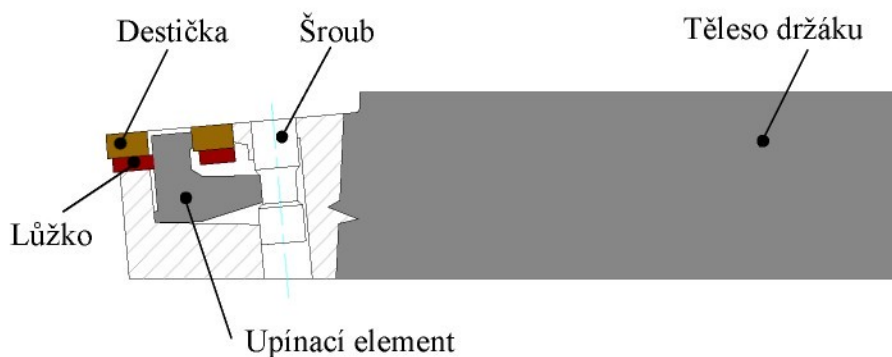
Obr. 6.7. Tvar a rozměry destiček AC 300G, AC 700G

Tab. 6.1. Rozměry destiček AC 300G, AC 700G

Rozměry					
[mm]					[°]
D	d	l	s	r	ϵ
12,7	5,16	12,9	4,76	0,8	80

Pro upnutí břitových destiček byl použit nástrojový držák: **PCLNR 25 25 M12 T**.

Na obr. 6.8 je znázorněné upnutí břitové destičky v nástrojovém držáku dle výše uvedeného označení.



Obr. 6.8. Upnutí břitové destičky v nástrojovém držáku

Princip naznačeného upínacího systému spočívá v používání destiček s válcovým průchozím otvorem, do kterého ze spodu zasahuje výkyvný element zatlačující destičku k bočním opěrným plochám. Výhodou je velmi přesné ustavení destičky a její přitlačení k opěrným plochám. To umožňuje práci také vedlejším břitem. Výměna destičky je velmi snadná (povolením šroubu), odchod třísek není omezen. Nevýhodou tohoto systému upínání je upínací mechanismus pod destičkou se značnými konstrukčními požadavky.

Geometrie nástroje s upnutou destičkou je následující:

- úhel hřbetu $\alpha_o = 0^\circ$
- úhel břitu $\beta_o = 90^\circ$
- úhel čela $\gamma_o = -5^\circ$
- úhel sklonu ostří $\lambda_s = -5^\circ$
- úhel nastavení $\kappa_r = 95^\circ$

6.2. Vlastní experiment

Před začátkem experimentu bylo třeba zvolit podmínky, za kterých bude proveden. Jednalo se především o stanovení řezné rychlosti, která má rozhodující vliv na trvanlivost nástroje, dále pak hloubky řezu a velikosti posuvu.

Při určování těchto parametrů se vycházelo jednak z pracovních možností stroje (rozsah otáček...) a jednak z parametrů, které byly voleny v předcházejících pracích provedených na KOM, a to vzhledem k volné návaznosti této práce a možnosti vzájemného porovnání výsledků.

6.2.1. Řezná rychlost

Pro každý druh břitové destičky (AC 300G, AC 700G) bylo stanoveno opotřebení při třech různých řezných rychlostech. Řezné rychlosti byly vzhledem k rovnoměrnému rozložení bodů pro konstrukci $T - v_c$ závislosti odstupňovány dle řady R10, jak doporučuje [2].

Hodnoty volených teoretických řezných rychlostí jsou následující (shodné pro oba druhy destiček a teoretický průměr obrobku 158 mm):

$v_{c1} = 278 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	(teoretické otáčky 560 min^{-1})
$v_{c2} = 352 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	(teoretické otáčky 710 min^{-1})
$v_{c3} = 447 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	(teoretické otáčky 900 min^{-1})

Jak je známo, velikost řezné rychlosti při soustružení lze popsat závislostí:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [m \cdot \min^{-1}] \quad (11)$$

kde: π - Ludolfovo číslo

D – průměr obrobku [mm]

n – otáčky [$\min^{-1}$]

Řezná rychlost je tedy závislá jednak na průměru obrobku a na velikosti otáček.

Vzhledem k tomu, že stroj SU 50 neumožňuje plynulou změnu otáček a vzhledem k rozdílným velikostem průměrů obrobků nebylo možné zaručit v rámci měření konstantní řeznou rychlost pro každou ze zvolených řad. Byly proto tedy měřeny skutečné otáčky příslušné jednotlivým průměrům a z nich byla následně stanovena řezná rychlost. Z vypočtených velikostí řezných rychlostí pak byla vypočítána průměrná řezná rychlost pro každou řadu, která byla určující pro stanovení $T - v_c$ závislosti.

Průměrná řezná rychlost byla určena ze vztahu:

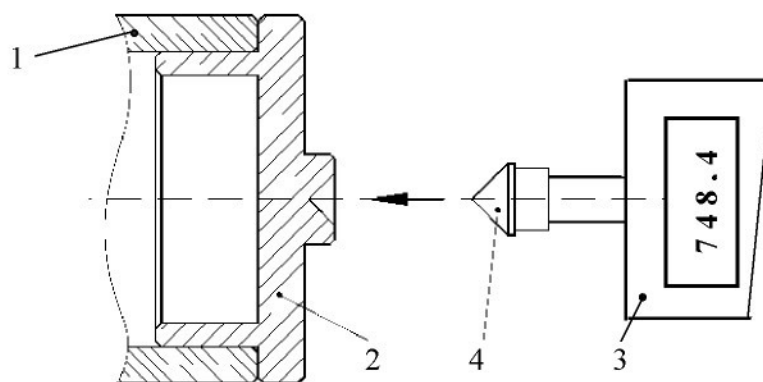
$$v_{opr} = \frac{\sum_{i=1}^n v_{ci}}{n} \quad [m \cdot \min^{-1}] \quad (12)$$

6.2.2. Otáčky

Byly měřeny skutečné otáčky, tj. otáčky při zatížení při obrábění všech obrobků a při všech záběrech.

Pro měření otáček byl použit digitální měřič otáček ONO SOKKI HT – 3100 s nasazeným hrotem KS – 300 pro měření otáček v ose vřetene. Princip měření spočívá v nastavení hrotu přístroje do přípravku ve vřetenu a zapnutí přístroje, přístroj přímo udává příslušné otáčky. Otáčkoměr byl nastaven na dolní rozsah otáček ($1,5 - 2000 \min^{-1}$). Přesnost měření při nastaveném dolním rozsahu otáček a otáčkách v rozmezí $1,5 - 1249,9 \min^{-1}$ činí $\pm 0,1 \min^{-1}$.

Schéma znázorňující měření otáček uvedeným přístrojem je na obr. 6.9.



1) Vřeteno stroje, 2) Přípravek, 3) Otáčkoměr ONO SOKKI, 4) Hrot

Obr. 6.9. Měření skutečných otáček vřetene

6.2.3. Posuv, hloubka řezu

Vzhledem k návaznosti na experimenty prováděné na KOM a doporučením výrobce destiček byly zvoleny následující podmínky experimentu [17]:

	<i>posuv [mm/ot]</i>	<i>hloubka řezu [mm]</i>
AC 300G	0,1	2
AC 700G	0,3	2

6.2.4. Měření opotřebení

Pro měření opotřebení zkoušených břitových destiček bylo zvoleno měření opotřebení břitových destiček mimo stroj. Jednou z nevýhod tohoto způsobu měření je především značná pracnost (častá manipulace s destičkami, jejich odepínání a upínání včetně nutnosti čištění dosedacích ploch v nožovém držáku).

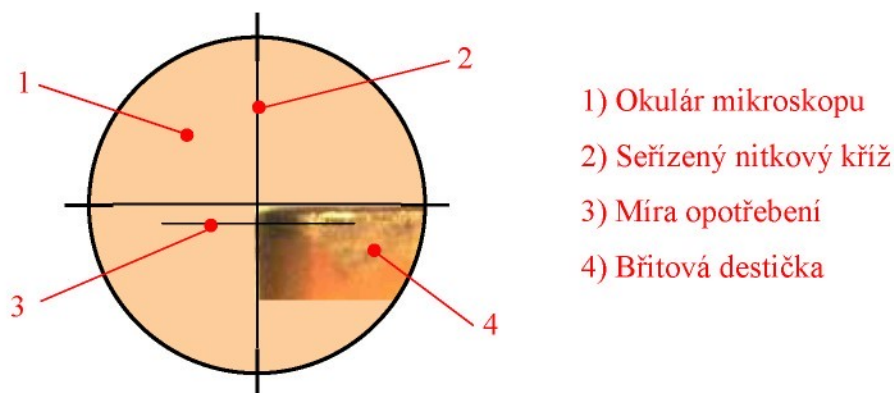
V této práci bylo vyhodnocováno opotřebení břitových destiček na hřbetě (viz. obr.4.5.).

6.2.4.1. Měřicí zařízení

Pro měření opotřebení byl použit dílenský mikroskop CARL – ZEISS JANA, typ 9730 s přesností měření 0,01 mm.

Při provádění měření opotřebení nebyl odepínán z nožové hlavy celý nástroj, ale pouze břitová destička. Tato byla po vyjmutí z nástrojového držáku upnuta do přípravku mikroskopu. Princip měření na mikroskopu CARL – ZEISS JANA spočíval v seřízení nitkového kříže na hrany břitové destičky a následném odečtení hodnot této polohy na stupnici. Následovalo posunutí nitkového kříže a odečtení opotřebení dle obr. 4.5. na

stupnici mikroskopu. Schéma znázorňující pohled na břitovou destičku v okuláru mikroskopu je uvedeno na obr. 6.10.



Obr. 6.10. Měření opotřebení – okulár mikroskopu

6.3. Vyhodnocení experimentu

Po změření opotřebení VB na hřbetě pro každou z testovaných břitových destiček při třech řadách řezných rychlostí byly vyneseny tyto závislosti do grafů $VB - T$. Dále bylo postupováno při stanovení koeficientů Taylorova vztahu dle kap. 5.1. Tento postup je dle [7] označován jako postup „odhadem“ a je méně přesný než stanovení příslušných koeficientů „výpočtem“. V této práci bylo použito postupu vyhodnocení výpočtem.

6.3.1. Postup vyhodnocení výpočtem

Tato metoda je přesnější než metoda odhadu ale vyhodnocení výsledků je podstatně pracnější a časově více náročné.

Taylorův vztah (3) upravený na vztah (5) představuje lineární závislost závisle proměnné $\log T$ na nezávisle proměnné $\log v_c$ (viz obr. 5.2.b.). Obecně lze závislost (5) vyjádřit rovnicí:

$$y = a + b \cdot x \quad (13)$$

kde: a, b – jsou koeficienty lineární regresní závislosti

Význam proměnných v (5) ve vztahu k rovnici (13):

$$y = \log T, \quad x = \log v_c, \quad a = \log C_T, \quad b = -m$$

Vstupní hodnoty (řeznou rychlost v_c a jí odpovídající trvanlivost T) je třeba určit přesněji, než při vyhodnocení odhadem. Při určování trvanlivosti T již nepostačí pouhé odečtení z grafu

závislosti $VB - T$. Taktéž při určování řezné rychlosti již nelze zanedbávat změnu řezné rychlosti se změnou průměru obrobku (viz. kap. 6.2.1.).

6.3.1.1. Stanovení trvanlivosti

Trvanlivost T se zjišťuje jako čas dosažení kritériálního opotřebení VB_K . Pro stanovení přesného času dosažení kritériálního opotřebení byla použita metoda lineární interpolace. Tato interpolace byla provedena mezi nejbližší vyšší a nejbližší nižší hodnotou opotřebení a výsledná trvanlivost T při dané řezné rychlosti v_c byla určena podle vztahu:

$$T = t_A + \left[\frac{t_B - t_A}{VB_B - VB_A} \cdot (VB_K - VB_A) \right] \quad [\text{min}] \quad (14)$$

kde: t_A je čas dosažení nejbližší nižší hodnoty opotřebení [min] než opotřebení kritériálního, VB_A vyjadřuje hodnotu tohoto opotřebení [mm], t_B je čas dosažení nejbližší vyšší hodnoty opotřebení [min] než opotřebení kritériálního a VB_B vyjadřuje hodnotu tohoto opotřebení [mm]

6.3.2. Výpočet regresních koeficientů

Při výpočtu hodnot koeficientů a , b lineární regresní rovnice (13) se předpokládá konstantní rozptyl pro všechny hodnoty závisle proměnné. Za tohoto předpokladu se vypočítají koeficienty a , b velmi přesně při použití *metody nejmenších čtverců* [1].

Koeficienty regresní lineární rovnice a , b se v případě užití metody nejmenších čtverců určují z *podmínky minima sumy čtverců odchylek*:

$$\sum (y - a - bx)^2 = \min \quad (15)$$

K splnění podmínky (15) je nutné derivovat podle obou koeficientů, tj.:

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum (y - a - bx)^2 = \sum 2(y - a - bx) \cdot (-1) = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum (y - a - bx)^2 = \sum 2(y - a - bx) \cdot (-x) = 0 \quad (17)$$

Velmi výhodným způsobem pro určení koeficientů a , b regresní rovnice je sestavení výsledků do tzv. vyhodnocovacího schématu.

Pro případ, kdy máme jen jednu hodnotu y_i pro každou hodnotu x_i je nejvýhodnější toto schéma:

i	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	x_1	y_1	x_1^2	$x_1 y_1$
2	x_2	y_2	x_2^2	$x_2 y_2$
i	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
n	x_n	y_n	x_n^2	$x_n y_n$
	Σx	Σy	Σx^2	$\Sigma x y$
	$(\Sigma x)^2$			

(18)

Při známých hodnotách Σx , Σx^2 , $(\Sigma x)^2$, Σy a $\Sigma x y$ se koeficienty regresní rovnice a , b získají řešením tzv. *normálních rovnic*, které vyplývají ze vztahů (16) a (17), mají tvar:

$$an + b \Sigma x - \Sigma y = 0, \quad (19)$$

$$a \Sigma x + b \Sigma x^2 - \Sigma xy = 0. \quad (20)$$

Jejich řešením se získá vztah pro výpočet směrnice regresní přímky neboli tzv. regresního koeficientu b :

$$b = \frac{(\Sigma x) \cdot (\Sigma y) - n \Sigma xy}{(\Sigma x)^2 - n \Sigma x^2} \quad (21)$$

Koeficient a , tj. posunutí se vypočte dosazením do rovnice:

$$a = \frac{1}{n} (\Sigma y - b \Sigma x) \quad (22)$$

6.3.3. Testování koeficientů

Koeficienty a , b mají charakter náhodné proměnné veličiny, a můžou se tedy jejich hodnoty porovnávat s teoretickou, resp. předpokládanou hodnotou α , β . K tomu se musí určit směrodatné odchylky těchto koeficientů s_a , s_b . Obě tyto směrodatné odchylky se počítají pomocí směrodatné odchylky $s_{y,x}$, která charakterizuje rozptýlení bodů okolo regresní přímky pro případ, že x je nezávisle a y jako závisle proměnná (tento případ).

Při určování hodnoty $s_{y,x}$ je výhodné následné schéma:

i	Y_i	$y_i - Y_i$	$(y_i - Y_i)^2$
1	Y_1	$y_1 - Y_1$	$(y_1 - Y_1)^2$
2	Y_2	$y_2 - Y_2$	$(y_2 - Y_2)^2$
⋮	⋮	⋮	⋮
n	Y_n	$y_n - Y_n$	$(y_n - Y_n)^2$

$$\Sigma (y_i - Y_i)^2 \quad (23)$$

V uvedeném schématu jsou y_i pokusně nalezené hodnoty a Y_i jsou hodnoty vypočtené z regresní rovnice pro odpovídající hodnoty x_i . Směrodatnou odchylku, která charakterizuje rozptýlení kolem regresní přímky, počítáme dle vztahu:

$$s_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - Y_i)^2}{n - 2}} \quad (24)$$

kde: n vyjadřuje počet provedených měření, $n = 3$

Odhad směrodatné odchylky koeficientu a , tj. s_a , vypočteme dle vztahu:

$$s_a = s_{y,x} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}} \quad (25)$$

kde: $\bar{x}$ je průměrná hodnota nezávislé proměnné x .

Směrodatnou odchylku koeficientu b , tj. s_b , pak vypočteme dle vztahu:

$$s_b = \frac{s_{y,x}}{\sqrt{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}} \quad (26)$$

Interval spolehlivosti hodnot koeficientů a a b při použití příslušné směrodatné odchylky určíme ze vztahu:

$$L_{(a)1,2} = a \pm s_a \cdot t_\alpha, \quad (27)$$

$$L_{(b)1,2} = b \pm s_b \cdot t_\alpha, \quad (28)$$

kde: t_α je kritická hodnota Studentova rozdělení pro zvolenou hladinu významnosti α a pro počet stupňů volnosti $\nu = n - 2$

Pro hodnotu Y_i vypočtenou z lineární regresní rovnice můžeme jako pro každou náhodnou veličinu určit interval spolehlivosti. Dolní a horní mez intervalu spolehlivosti hodnoty Y_i , odpovídající hodnotě nezávisle proměnné x_i , lze za předpokladu normálního rozdělení vypočítat dle vztahu:

$$L_{1,2} = Y_i \pm t_\alpha \cdot s_{y,x} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(X_i - \bar{x})^2}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}}, \quad (29)$$

Výsledkem regresní analýzy jsou hodnoty koeficientů a a b rovnice (13). Konstanty Taylorova vztahu určíme dle kap. 6.3.1.

7. Zpracování naměřených hodnot

Podstatou provedených experimentů bylo získání hodnot opotřebení VB břitových destiček na hřebetě v závislosti na čase T pro tři řady řezných rychlostí. Tyto hodnoty opotřebení v závislosti na čase s hodnotami příslušných řezných rychlostí byly tedy základními vstupními parametry, z kterých se vycházelo při stanovení příslušných grafických závislostí a konstant základního Taylorova vztahu (3), resp. (4).

7.1. Vyhodnocení destiček AC 300G

7.1.1. Opotřebení destiček v závislosti na čase

Při měření opotřebení břitových destiček AC 300 G pro tři řady teoretických řezných rychlostí (278, 352 a 447 m/min) byly změřeny skutečné otáčky a z nich pomocí vztahu (11) vypočteny příslušné řezné rychlosti. Průběh uvedeného měření se všemi parametry je zpracován v tab. 7.1. Přiřazení průměrů D_p z tab. 7.1. jednotlivým válcům je uvedeno v Příloze IV.

Pro stanovení závislosti $VB - T$ bylo nutné určit průměrné řezné rychlosti, kterými se obrábělo. Podle vztahu (12) byly vypočítány průměrné řezné rychlosti pro všechny tři řady rychlostí.

Tab. 7.1. Výsledky měření AC 300G

AC 300G, f = 0,1 mm/ot, a _p = 2 mm														
Břit č. 1					Břit č. 2					Břit č. 3				
v _{1teor} = 278 [m/min]					v _{2teor} = 352 [m/min]					v _{3teor} = 447 [m/min]				
n _{1sk} [ot/min]	D _p [mm]	v _{c1sk} [m/min]	T [min]	VB [mm]	n _{2sk} [ot/min]	D _p [mm]	v _{c2sk} [m/min]	T [min]	VB [mm]	n _{3sk} [ot/min]	D _p [mm]	v _{c3sk} [m/min]	T [min]	VB [mm]
584,0	158,0	289,88	1,3	0,07	728,0	150,0	343,06	1,0	0,10	930,0	149,2	435,79	1,0	0,14
584,0	158,0	289,88	2,3	0,11	728,0	150,0	343,06	2,3	0,13	930,0	149,2	435,79	2,0	0,15
584,0	158,0	289,88	3,3	0,15	728,0	150,0	343,06	4,1	0,145	930,0	145,2	424,22	3,0	0,18
584,0	158,0	289,88	4,3	0,17	720,0	158,0	357,39	5,4	0,15	930,0	145,2	424,22	4,0	0,19
584,0	158,0	289,88	5,3	0,18	720,0	158,0	357,39	8,1	0,16	931,0	153,8	449,69	5,1	0,2
584,0	154,0	282,54	7,0	0,18	725,0	154,0	350,76	12,1	0,18	931,0	153,8	449,69	6,4	0,21
584,0	154,0	282,54	10,4	0,18	725,0	150,0	341,65	16,1	0,185	930,0	149,8	437,64	8,2	0,23
589,0	150,0	277,56	15,4	0,19	725,0	146,0	337,09	20,1	0,19	930,0	149,8	437,64	9,5	0,24
582,0	158,7	290,17	20,4	0,19	720,0	157,8	356,93	24,1	0,23	930,0	149,8	425,64	10,5	0,25
589,0	154,7	286,26	25,4	0,19	729,0	153,8	352,24	28,1	0,34	928,0	145,8	425,02	11,7	0,3
589,0	150,7	278,85	30,4	0,19										
592,0	146,7	272,84	35,4	0,20										
594,0	158,0	289,88	40,4	0,23										
592,0	154,0	286,41	45,4	0,38										

Ukázkový výpočet průměrné řezné rychlosti je proveden pro břit č. 3 destičky AC 300G:

$$v_{cpr} = \frac{2 \cdot (435,79 + 424,22 + 449,69 + 437,64) + 425,64 + 425,02}{10} = 434,53 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

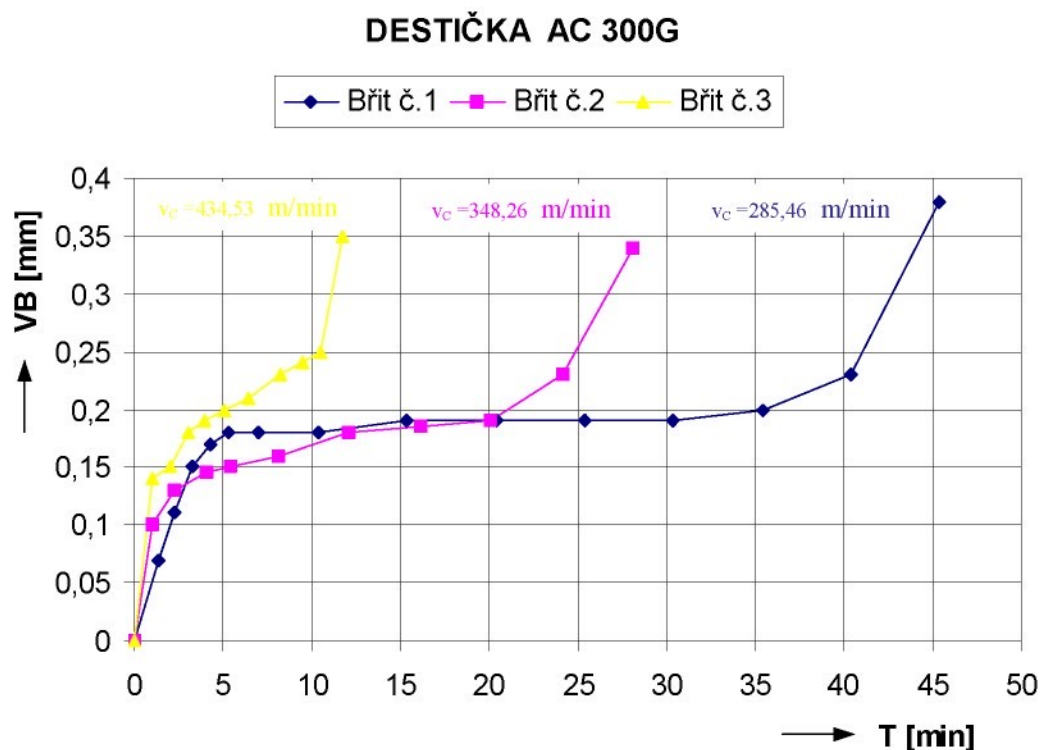
Vypočítané průměrné řezné rychlosti pro tři řady řezných rychlostí pro destičku AC 300G jsou uvedeny v tab. 7.2.

Tab. 7.2. Průměrné řezné rychlosti – AC 300G

AC 300G		
Břit č. 1	Břit č. 2	Břit č. 3
v _{cpr1} [m · min ⁻¹]	v _{cpr2} [m · min ⁻¹]	v _{cpr3} [m · min ⁻¹]
285,46	348,26	434,53

Závislost opotřebení na čase VB – T je uvedena na obr. 7.1.

Při obrábění s břitem č.1 a břitem č.3 bylo získáno klasicky vyvinuté opotřebení břitové destičky na hřbetě. Při obrábění s břitem č.2 došlo v čase T = 28,1 min od začátku zkoušky k lomu v oblasti špičky břitu a zkouška s tímto břitem byla ukončena. Fotografie opotřebení břitu č.2 a břitu č.3 viz. Příloha VIII.



Obr. 7.1. Závislost opotřebení na čase – destička AC 300G

7.1.2. Stanovení kritériálního opotřebení

Pro stanovení hodnoty kritériálního opotřebení byla rozhodující jednak získaná grafická závislost $VB - T$ a dále pak informace uvedené v [17].

Na základě výše uvedených podkladů byla zvolena hodnota kritériálního opotřebení pro destičku AC 300G, $VB_k = 0,22 \text{ mm}$.

7.1.3. Stanovení trvanlivostí

Trvanlivosti břitů pro jednotlivé průměrné řezné rychlosti byly stanoveny metodou lineární interpolace s využitím vztahu (14) a údajů z tab. 7.1.

Ukázkový výpočet je proveden pro břit č.1 destičky AC 300G:

$$T = 35,4 + \left[\frac{40,4 - 35,4}{0,23 - 0,2} \cdot (0,22 - 0,2) \right]$$

$$T = 38,7 \text{ min.}$$

Trvanlivosti vypočítané pro všechny břity AC 300G jsou uvedeny v tab. 7.3.

Tab. 7.3. Trvanlivosti břitů destičky AC 300G

AC 300G, $VB_K = 0,22$					
Číslo břítu	t_A [min]	t_B [min]	VB_A [mm]	VB_B [mm]	T [min]
1	35,4	40,4	0,20	0,23	38,7
2	20,1	24,1	0,19	0,23	23,1
2	6,4	8,2	0,21	0,23	7,3

7.1.4. Výpočet koeficientů regresní rovnice

Pro výpočet hodnot koeficientů a a b lineární regresní rovnice (13) byla použita metoda nejmenších čtverců (viz. kap. 6.3.2). Pro řešení tzv. *normálních rovnic* (19), (20) byly vstupní hodnoty Σx , Σx^2 , $(\Sigma x)^2$, Σy a $\Sigma x y$ uspořádány do tab. 7.4. dle výpočtového schématu (18).

Tab. 7.4. Schéma pro výpočet regresních koeficientů

Břit č.	v_c [m/min]	T [min]	$x = \log v_c$	$y = \log T$	x^2	xy
1	285,46	38,7	2,455547	1,588047	6,029713	3,899526
2	348,26	23,1	2,541904	1,363612	6,461274	3,466170
3	434,53	7,3	2,638022	0,863323	6,959163	2,277465
			$\Sigma x =$	$\Sigma y =$	$\Sigma x^2 =$	$\Sigma xy =$
			7,635473	3,814982	19,450149	9,643161
			$(\Sigma x)^2 =$			
			58,300455			

Dosazením hodnot Σx , Σx^2 , $(\Sigma x)^2$, Σy a $\Sigma x y$ z tab. 7.4. do rovnic (21) a (22) byly vypočteny regresní koeficienty b a a :

$$b = \frac{7,635473 \cdot 3,814982 - 3 \cdot 9,643161}{58,300455 - 3 \cdot 19,450149} = -3,994784$$

$$a = \frac{1}{3} [3,814982 - (-3,994784) \cdot 7,635473] = 11,439021$$

Provedením výše uvedené regresní analýzy byl stanoven následující tvar rovnice (13):

$$y = 11,439021 + (-3,994784) \cdot x \quad (30)$$

7.1.4.1. Testování regresních koeficientů

Koeficienty a , b mají charakter náhodné proměnné veličiny a můžou se tedy jejich hodnoty porovnávat s teoretickou, resp. předpokládanou hodnotou α , β . K tomu byly určeny směrodatné odchylky těchto koeficientů s_a , s_b . Obě tyto směrodatné odchylky byly spočítány pomocí směrodatné odchylky $s_{y,x}$, která charakterizuje rozptýlení bodů okolo regresní přímky pro případ, že x je nezávisle a y jako závisle proměnná (tento případ).

Při určování hodnoty $s_{y,x}$ byly vstupní hodnoty sestaveny do tab. 7.5 dle (23).

Tab. 7.5. Schéma pro výpočet směrodatné odchylky $s_{y,x}$

i	Y_i	$y_i - Y_i$	$(y_i - Y_i)^2$
1	1,6296351	-0,041588	0,0017295
2	1,2846607	0,078951	0,0062333
3	0,9006865	-0,037364	0,001396
			$\Sigma(y_i - Y_i)^2 =$
			0,0093589

Směrodatná odchylka $s_{y,x}$ byla vypočítána dle vztahu (24) a hodnot uvedených v tab. 7.5.:

$$s_{y,x} = \sqrt{\frac{0,0093589}{3-2}} = 0,0967414$$

Odhad směrodatné odchylky koeficientu a , tj. s_a byl proveden dle vztahu (25):

$$s_a = 0,096741 \cdot \sqrt{\left[\frac{1}{3} + \frac{2,545158^2}{19,450149 - \frac{58,300455}{3}} \right]}$$

$$s_a = 1,90817$$

Směrodatná odchylka koeficientu b , tj. s_b byla vypočítána dle vztahu (26):

$$s_b = \frac{0,096741}{\sqrt{\left[19,450149 - \frac{58,300455}{3} \right]}}$$

$$s_b = 0,74909$$

Interval spolehlivosti hodnot koeficientů a , b byl vypočten pro zvolenou hladinu významnosti $\alpha = 0,1$ [1] podle vztahů (27) a (28):

$$L_{(a)1,2} = 11,439021 \pm 1,90817 \cdot 6,314$$

$$L_{(a)1} = 23,487206$$

$$L_{(a)2} = -0,609164$$

$$L_{(b)1,2} = -3,994784 \pm 0,74909 \cdot 6,314$$

$$L_{(b)1} = 0,734971$$

$$L_{(b)2} = -8,724538$$

Po zjištění intervalu spolehlivosti hodnot koeficientů a , b byl pomocí vztahu (29) stanoven interval spolehlivosti ($\alpha = 0,1$) hodnoty Y_i vypočtené z regresní rovnice (13). Zde je uveden ukázkový výpočet pro hodnotu řezné rychlosti $v_c = 348,26 \text{ m/min}$:

$$L_{1,2} = 1,284662 \pm 6,314 \cdot 0,096741 \cdot \sqrt{\left[\frac{1}{3} + \frac{(2,541904 - 2,545158)^2}{19,450149 - \frac{58,300455}{3}} \right]}$$

$$L_1 = 0,931817$$

$$L_2 = 1,637507$$

Z toho vyplývá, že interval spolehlivosti pro příslušnou hodnotu Y_i vypočítanou z regresní rovnice je pro danou řeznou rychlost $19,260253 \pm 2,253434$ minut.

7.1.5. Extrapolace řezné rychlosti

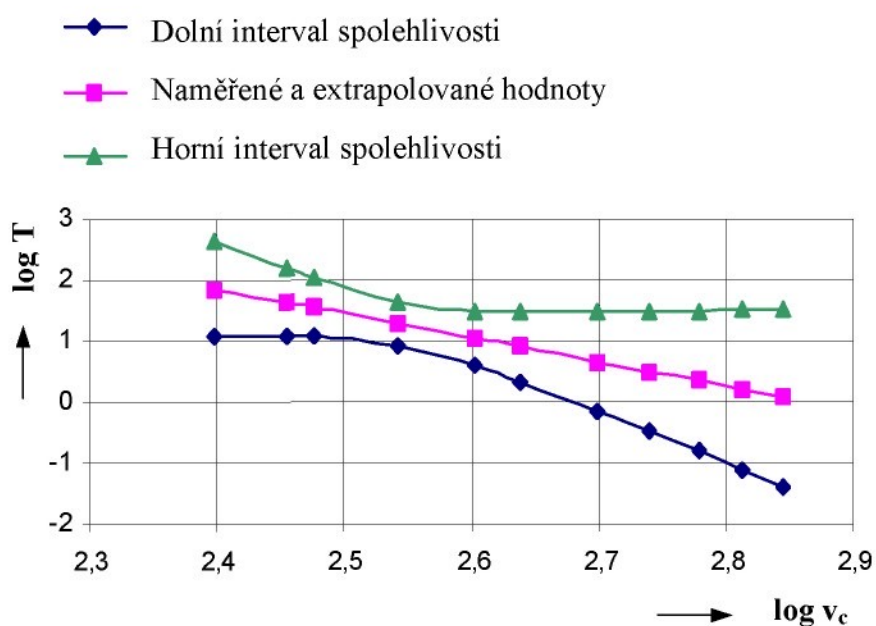
Popsané měření bylo provedeno při třech řezných rychlostech. Následně byla provedena extrapolace [1] pomocí získané regresní přímky (30) pro hodnoty řezné rychlosti v rozsahu $250 \div 700 \text{ m/min}$ a vypočítán interval spolehlivosti pro toto rozšířené pásmo řezných rychlostí (viz. tab. 7.6.).

Graf znázorňující závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ pro rozšířené pásmo řezných rychlostí je uveden v Příloze VI.

Graf znázorňující závislost $T = f(v_c)$ s vyznačeným pásem spolehlivosti regresní lineární závislosti je uveden na obr. 7.2.

Tab. 7.6. Interval spolehlivosti pro rozšířené pásmo řezných rychlostí č.1

v_c [m/min]	X_i	Y_i	$L_1 (-)$	$L_2 (+)$
250,0	2,39794	1,859766	1,079311	2,64022
285,46	2,455547	1,629637	1,078363	2,18091
300,0	2,477121	1,543454	1,066151	2,020756
348,26	2,541904	1,284662	0,931817	1,637507
400,0	2,60206	1,04435	0,600846	1,487854
434,53	2,638022	0,900688	0,337496	1,46388
500,0	2,69897	0,657216	-0,15119	1,465619
550,0	2,740363	0,491861	-0,49642	1,480143
600,0	2,778151	0,340904	-0,81611	1,497919
650,0	2,812913	0,202036	-1,11253	1,516607
700,0	2,845098	0,073466	-1,38833	1,535258



Obr. 7.2. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ s vyznačeným pásem spolehlivosti lineární regresní závislosti

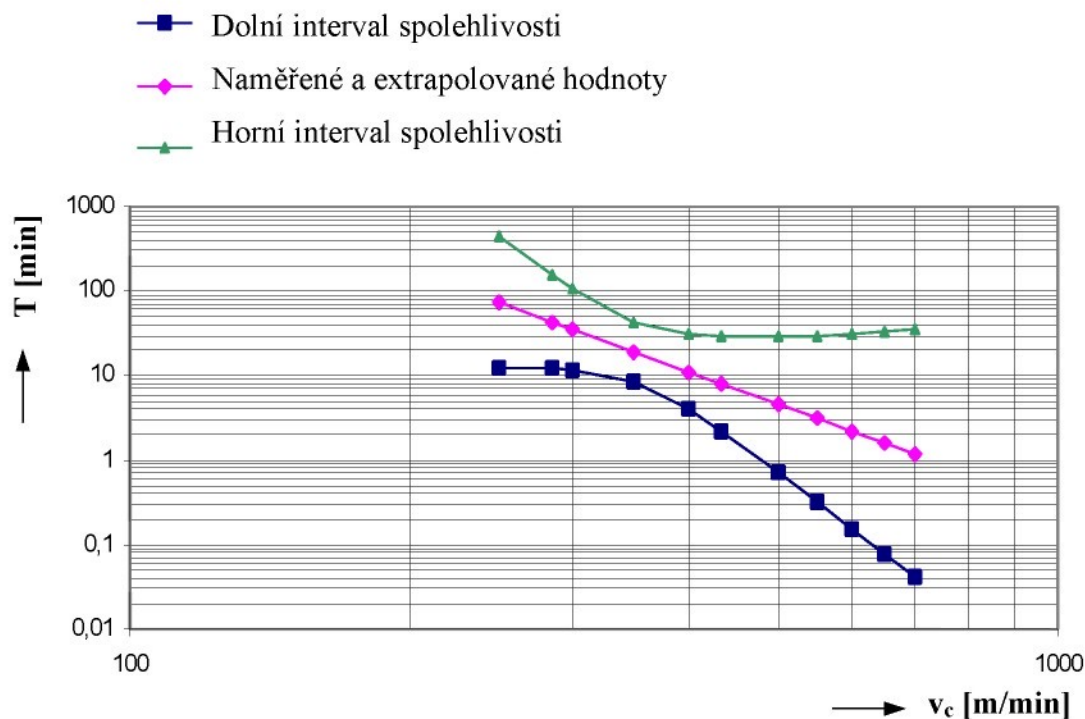
Obr. 7.2. znázorňuje, že pro hodnoty extrapolovaných řezných rychlostí 500 ÷ 700 m/min z tab. 7.6 dosahují hodnoty funkce $\log T$ ($0 < T < 1$ minut) záporných hodnot pro dolní interval spolehlivosti. Z teoretického hlediska lze považovat za nejnižší trvanlivost, kterou může nástroj dosáhnout, trvanlivost 0 minut. Těto teoreticky nulové trvanlivosti nástroj dosáhne, jestliže dojde při dané řezné rychlosti k jeho okamžitému opotřebení (destrukci). V daném případě lze za takové podmínky považovat řeznou rychlost

$v_c = 700 \text{ m/min}$, při které dosahuje nástroj trvanlivosti $T = 0,073466 \text{ min}$ a funkce $\log T$ nabývá hodnoty $\log T = -1,38833$.

Hodnoty uvedené v tab. 7.6. byly odlogaritmovány a následně sestaveny do tab. 7.7. Z hodnot uvedených v tab. 7.7. byl zhotoven graf znázorňující závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích (viz. Příloha VI.) a dále závislost $T = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích včetně pásu spolehlivosti (viz. obr. 7.3.).

Tab. 7.7. Interval spolehlivosti pro rozšířené pásmo řezných rychlostí č.2

v_c [m/min]	Y_i	$L_1 (-)$	$L_2 (+)$
250,0	72,404524	12,003584	436,73747
285,46	42,622273	11,977423	151,67354
300,0	34,950522	11,64532	104,89527
348,26	19,26026	8,5470663	43,401749
400,0	11,075167	3,9888357	30,750661
434,53	7,9558751	2,1751857	29,099102
500,0	4,5416708	0,7060126	29,21587
550,0	3,1035645	0,3188442	30,209464
600,0	2,1923183	0,1527173	31,471608
650,0	1,5923425	0,0771731	32,855424
700,0	1,1843105	0,0408953	34,297124



Obr. 7.3. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích s vyznačeným pásmem spolehlivosti

7.1.6. Výpočet konstant a exponentu Taylorova vztahu

Výpočet konstant C_T , C_v a exponentu m Taylorova vztahu (3) resp. (4) byl proveden podle údajů uvedených v kap. 6.3.1.

Výpočet exponentu m : $m = -b$, $m = 3,994784$

Výpočet konstant C_T , C_v : $a = \log C_T \Rightarrow C_T = 10^a$

$$C_T = 10^{11,439021} = 2,748027029 \cdot 10^{11}$$

$$C_v = C_T^{\frac{1}{m}}, \quad C_v = (2,748027029 \cdot 10^{11})^{\frac{1}{3,994784}} = 730,279719$$

Hodnoty konstant a exponentu základního Taylorova vztahu pro povlakované slinuté karbidy by měly řádově nabývat těchto velikostí [2]:

$$C_T (10^9 \div 10^{13})$$

$$C_v (10^2 \div 10^3)$$

$$m (2,5 \div 5)$$

Experimentem a následným zpracováním získaných hodnot byly stanoveny konstanty C_T , C_v a exponent m základního Taylorova vztahu, jejichž hodnoty odpovídají řádově hodnotám specifickým pro daný druh materiálu břitových destiček.

7.2. Vyhodnocení destiček AC 700G

Při vyhodnocování experimentu prováděného na břitových destičkách AC 700G bylo postupováno obdobně jako při vyhodnocování experimentu na břitových destičkách AC 300G. Z tohoto důvodu jsou uváděny pouze vybrané tabulkově a graficky zpracované výsledky. Údaje doplňující zpracování výsledků viz. Příloha V.

7.2.1. Opotřebení destiček v závislosti na čase

Tab. 7.8. Výsledky měření AC 700G

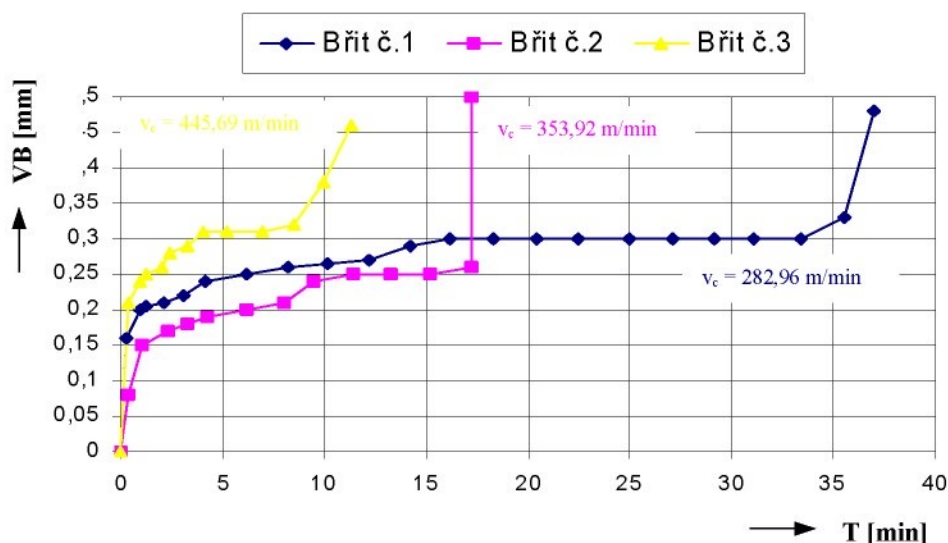
AC 700G, $f = 0,3 \text{ mm/ot}$, $a_p = 2 \text{ mm}$														
Břit č. 1					Břit č. 2					Břit č. 3				
$v_{1\text{teor}} = 278 \text{ [m/min]}$					$v_{2\text{teor}} = 352 \text{ [m/min]}$					$v_{3\text{teor}} = 447 \text{ [m/min]}$				
n_{1sk} [ot/min]	D_p [mm]	v_{c1sk} [m/min]	T [min]	VB [mm]	n_{2sk} [ot/min]	D_p [mm]	v_{c2sk} [m/min]	T [min]	VB [mm]	n_{3sk} [ot/min]	D_p [mm]	v_{c3sk} [m/min]	T [min]	VB [mm]
586,0	159,0	292,71	0,3	0,16	740,0	156,5	363,83	0,35	0,08	927,0	158,0	460,14	0,4	0,21
586,0	159,0	292,71	1,0	0,2	740,0	156,5	363,83	1,05	0,15	927,0	158,0	460,14	1,0	0,24
586,0	159,0	292,71	1,3	0,20	740,0	152,5	354,53	2,3	0,17	927,0	158,0	460,14	1,24	0,25
586,0	159,0	292,71	2,1	0,21	740,0	152,5	354,53	3,3	0,18	929,0	154,0	449,46	2,04	0,26
588,0	155,0	286,32	3,1	0,22	742,0	148,5	346,16	4,3	0,19	924,0	154,0	447,03	2,45	0,28
588,0	155,0	286,32	4,2	0,24	740,0	154,0	358,01	6,2	0,20	924,0	150,0	435,42	3,25	0,29
590,0	151,0	279,88	6,2	0,25	740,0	157,0	364,99	8,0	0,21	928,0	150,0	437,30	4,05	0,30
592,0	147,0	273,39	8,2	0,26	740,0	153,0	355,69	9,5	0,24	928,0	150,0	437,30	4,45	0,31
586,0	157,6	290,13	10,2	0,26	742,0	149,0	347,32	11,4	0,25	932,0	149,8	438,60	5,25	0,31
588,0	153,6	283,73	12,2	0,27	740,0	152,4	354,29	13,3	0,25	932,0	156,0	456,76	7,0	0,31
590,0	149,6	277,28	14,2	0,29	742,0	148,4	345,92	15,2	0,25	932,0	152,0	445,05	8,5	0,315
590,0	145,6	269,87	16,2	0,30	742,0	148,4	345,92	17,2	0,26	932,0	148,0	433,33	10,0	0,34
586,0	158,3	291,42	18,3	0,30										
588,0	154,3	285,03	20,4	0,30										
590,0	150,3	278,58	22,5	0,30										
594,0	146,3	273,01	25,0	0,30										
586,0	158,7	292,16	27,1	0,30										
588,0	154,7	285,77	29,2	0,30										
590,0	150,7	279,32	31,1	0,30										
594,0	146,7	273,75	33,4	0,30										
594,0	148,0	276,18	35,5	0,33										
594,0	145,8	272,07	37,0	0,48										

Tab. 7.9. Průměrné řezné rychlosti – AC 700G

AC 700G		
Břit č. 1	Břit č. 2	Břit č. 3
$v_{cpr1} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$	$v_{cpr2} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$	$v_{cpr3} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$
282,96	353,92	445,69

Při obrábění s břitkem č. 2 destičky AC 700G došlo při řezné rychlosti $v_{cpr} = 353,92 \text{ m/min}$ v čase $T = 17,2 \text{ min}$ od začátku zkoušky k vylomení břitu v oblasti špičky a ukončení jeho trvanlivosti (viz. fotografie v Příloze VIII.). Tento stav břitu vyznačuje na obr. 7.4 svislá část křivky znázorňující průběh opotřebení břitu č.2. Při obrábění s břitkem č. 1 a břitkem č. 3 bylo dosaženo klasicky vyvinutého opotřebení na hřbetě (viz. fotografie břitu č. 1 v Příloze VIII.).

DESTIČKA AC 700G



Obr. 7.4. Závislost opotřebení na čase – destička AC 700G

7.2.2. Stanovení kritériálního opotřebení

Na základě výše uvedených podkladů byla zvolena hodnota kritériálního opotřebení pro destičku AC 700G, $VB_k = 0,32 \text{ mm}$.

7.2.3. Stanovení trvanlivosti

U bříty č.2 nebylo vzhledem k lomu dosaženo hodnoty kritériálního opotřebení.

Tab. 7.10. Trvanlivosti břitů destičky AC 700G

AC 700G, $VB_K = 0,32$					
Číslo bříty	t_A [min]	t_B [min]	VB_A [mm]	VB_B [mm]	T [min]
1	33,4	35,5	0,30	0,33	37,6
2	17,2		0,26		17,2
2	8,5	10,0	0,315	0,34	8,8

7.2.4. Výpočet koeficientů regresní rovnice

Tabulkově uspořádané hodnoty dle schématu (18) pro výpočet koeficientů a a b lineární regresní rovnice (13) jsou uvedeny v Příloze V.

Provedením regresní analýzy byl stanoven následující tvar rovnice (13):

$$y = 9,398852 + (-3,195089) \cdot x \quad (31)$$

7.2.4.1. Testování regresních koeficientů

Tabulkově uspořádané hodnoty dle schématu (23) pro směrodatné odchylky $s_{y,x}$ jsou uvedeny v Příloze V.

Tab. 7.11. Směrodatné odchylky

$S_{y,x}$	S_a	S_b
0,023692	0,433211	0,169809

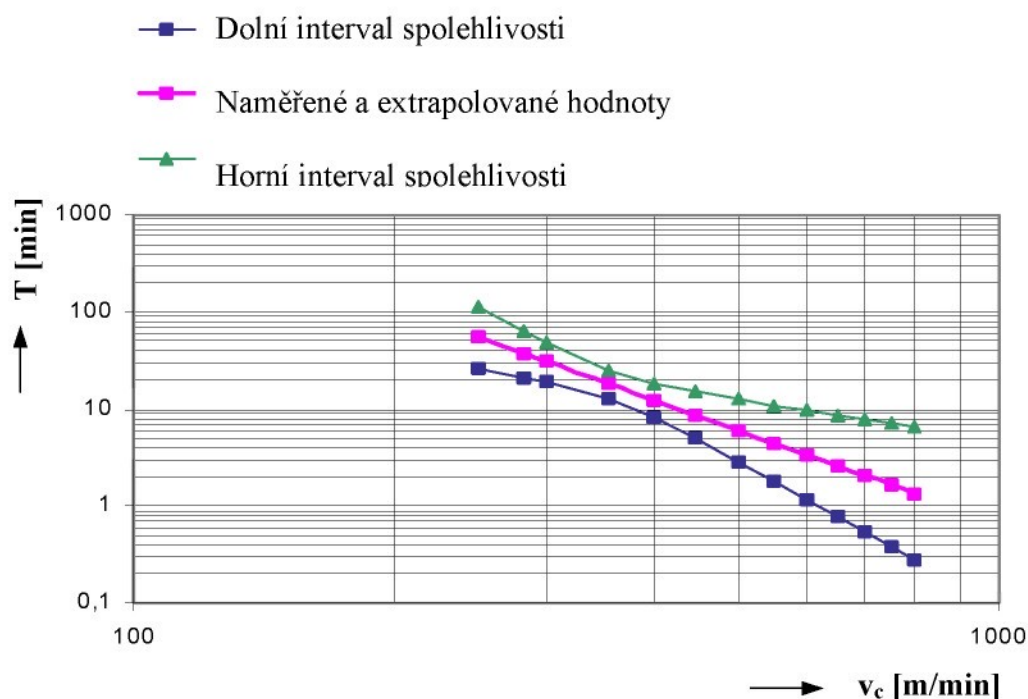
Intervaly spolehlivosti hodnot koeficientů a , b a hodnoty Y_i byly vypočteny pro zvolenou hladinu významnosti $\alpha = 0,05$.

7.2.5. Extrapolace řezné rychlosti

Pomocí získané regresní přímky (31) byla provedena extrapolace pro hodnoty řezné rychlosti v rozsahu $250 \div 800$ m/min a vypočítán interval spolehlivosti pro toto rozšířené pásmo řezných rychlostí (viz. Příloha V.).

Na obr. 7.5. je znázorněna závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích s vyznačeným pásem spolehlivosti.

Doplňující grafické závislosti pro destičku AC 700G jsou uvedeny v Příloze VII.



Obr. 7.5. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích s vyznačeným pásem spolehlivosti

7.2.6. Výpočet konstant a exponentu Taylorova vztahu

Pro destičku AC 700G byly vypočítány následující hodnoty konstant C_T , C_v a exponentu m :

$$m = 3,195089$$

$$C_T = 2,505255361 \cdot 10^9$$

$$C_v = 874,290015$$

Experimentem a následným zpracováním získaných hodnot byly stanoveny konstanty C_T , C_v a exponent m základního Taylorova vztahu, jejichž hodnoty odpovídají řádově hodnotám specifickým pro daný druh materiálu břitových destiček [2].

8. Porovnání destiček AC 300G, AC 700G

Rozhodující vliv na dosažení určité trvanlivosti má řezná rychlost. Z tohoto důvodu byly rozhodujícími parametry pro srovnání obou typů břitových destiček řezná rychlost a příslušná dosažená trvanlivost.

Zkoušky na obou typech břitových destiček byly provedeny při třech řadách řezných rychlostí. Na základě získaných regresních závislostí byly pomocí extrapolace získány hodnoty trvanlivosti pro rozšířená pásma řezných rychlostí. Pro destičku AC 300G bylo zvoleno pásmo řezných rychlostí 250 ÷ 700 m/min, pro destičku AC 700G 250 ÷ 800 m/min. Spodní hranice rozšířeného pásma byla zvolena 250 m/min u obou destiček s ohledem na dříve prováděné zkoušky na KOM. Horní hranice byly voleny s ohledem na dosažení minimální trvanlivosti pro daný typ destičky.

8.1. Destička AC 300G

Nejvyšší trvanlivost ($T = 72,40$ min) byla vypočítána pro řeznou rychlost $v_c = 250$ m/min, nejnižší $T = 1,18$ minut pro $v_c = 700$ m/min. Dle [17] je destička AC 300G určena pro obrábění do rychlosti 350 m/min. Při prováděných zkouškách bylo při obrábění $v_c = 348,26$ m/min dosaženo $T = 19,26$ minut.

8.1.1. Optimalizační závěry

Z ekonomického hlediska, které je kritériem minimálních výrobních nákladů, lze v současné době považovat za optimální trvanlivost $T_{opt} = 10 \div 15$ minut. Za tuto optimální trvanlivost lze v daném případě považovat $T = 11,07$ minut, která odpovídá $v_c = 400$ m/min.

Cena jedné břitové destičky AC 300G, AC 700G (165 Kč/ks) je v porovnání se srovnatelnými destičkami (dle dostupných katalogových údajů a ceníků) jiných výrobců o 30 a více procent nižší a je tedy vhodným prostředkem pro nasazení za stanovených podmínek obrábění.

Vzhledem k *dosažení maximální produktivity (výkonová optimalizace)* lze ve specifických případech uvažovat za optimální trvanlivost $T_{opt} \approx 3 \div 5$ minut. V daném případě odpovídá T_{opt} , $T = 3,10$ minut při $v_c = 550$ m/min.

V rozsahu rozšířeného pásma řezných rychlostí (250 ÷ 700 m/min) byly stanoveny intervaly spolehlivosti (29), resp. pás spolehlivosti, pro hodnoty trvanlivosti vypočítané z regresní rovnice (30). Na hodnoty intervalů spolehlivosti má rozhodující vliv počet provedených měření (pro tuto destičku byla provedena celkem tři měření). Pro zvýšení přesnosti hodnot vypočtených z regresní rovnice (30) lze jednoznačně doporučit zvýšení počtu měření za stejných podmínek (vzhledem k omezenému počtu obrobků nebylo možné měření provést opakovaně). Větší počet měření má vliv na zúžení příslušného pásu spolehlivosti.

8.1.2. Oblast aplikace – omezení

Za podmínku omezující nasazení destiček AC 300G je možné považovat řeznou rychlost, při které bude dosaženo trvanlivosti $T < T_{opt}$ při výkonové optimalizaci. Tato podmínka je splněna pro $v_c > 550$ m/min. Použití při $v_c > 550$ m/min nelze tedy vzhledem k nízkým hodnotám trvanlivosti doporučit. Pro aplikaci v rychlostním obrábění jsou břitové destičky AC 300G nevhodné.

8.1.3. Konstanty a exponent Taylorova vztahu

Vypočítané hodnoty konstant C_T , C_v a exponentu m základního Taylorova vztahu byly spolu s doporučenou oblastí nasazení (viz. kap. 6.1.3.1.) těchto destiček porovnány s údaji

konkurenčních výrobců (Widia, Tizit, Pramet) [2]. Provedeným experimentem bylo zjištěno, že destičky AC 300G vykazují srovnatelné hodnoty konstant C_T , C_v a exponentu m . Také oblast použití je srovnatelná s břitovými destičkami vyráběnými jinými výrobci.

8.2. Destička AC 700G

Pro spodní hranici pásma řezných rychlostí $v_c = 250$ m/min byla vypočítána trvanlivost $T = 54,34$ minut (ve srovnání s AC 300G o 18 minut nižší). Destičky AC 700G jsou jako destičky AC 300G určeny pro použití do řezných rychlostí 350 m/min. Pro $v_c = 354,58$ m/min byla vypočítána $T = 17,88$ minut. V porovnání obou druhů destiček byla vzhledem k vypočítané trvanlivosti jako lepší vyhodnocena destička AC 300G pro oblast $v_c < 350$ m/min, pro $v_c > 350$ m/min destička AC 700G.

8.2.1. Optimalizační závěry

Z ekonomického hlediska byla vypočítána optimální trvanlivost $T_{opt} = 12,19$ minut při stejné řezné rychlosti jako u destičky AC 300G, tj. při $v_c = 400$ m/min.

Optimální trvanlivost při výkonové optimalizaci pro destičku AC 700G byla vypočítána pro $v_c = 600$ m/min, $T_{opt} = 3,35$ minut.

Pro zvýšení přesnosti hodnot vypočtených z regresní rovnice (31) a pro zúžení příslušného pásu spolehlivosti těchto hodnot lze jako v případě destičky AC 300G doporučit zvýšení počtu provedených měření za stejných podmínek.

8.2.2. Oblast aplikace – omezení

Trvanlivost $T < T_{opt}$ při výkonové optimalizaci byla vypočítána pro $v_c > 600$ m/min. Použití při $v_c > 600$ m/min nelze tedy vzhledem k nízkým hodnotám trvanlivosti doporučit. Pro aplikaci v rychlostním obrábění jsou břitové destičky AC 700G nevhodné.

8.2.3. Konstanty a exponent Taylorova vztahu

Provedeným experimentem a porovnáním výsledků s údaji jiných výrobců bylo zjištěno, že destičky AC 700G vykazují srovnatelné hodnoty konstant C_T , C_v a exponentu m při nasazení za obdobných podmínek.

Při vzájemném porovnání destiček AC 700G s AC 300G byly pro destičku AC 700G vypočítány nižší hodnoty exponentu m a konstanty C_T , vyšší hodnota konstanty C_v . Nižší hodnota exponentu m charakterizuje, že s rostoucí řeznou rychlostí pro daný řezný materiál trvanlivost klesá pomaleji než pro řezný materiál s vyšší hodnotou m [8]. Tento teoretický předpoklad byl provedenými zkouškami potvrzen.

8.3. Řezné prostředí

Břítové destičky AC 300G a AC 700G jsou určeny pro obrábění za sucha – bez procesních kapalin [17]. Z tohoto hlediska není nutné při nasazení těchto destiček uvažovat investiční náklady na pořízení, recyklaci, popř. likvidaci procesních kapalin a dále problematiku působení procesních kapalin na životní prostředí. Destičky AC 300G a AC 700G jsou vhodným řezným materiálem pro nasazení v tzv. ekologickém obrábění.

9. Závěr

V praktické části této diplomové práce byly prováděny experimenty (zkoušky trvanlivosti) na břitových destičkách AC 300G a AC 700G fy. SUMITOMO ELECTRIC dodané společností F.I.S.M. – produktivní nástroje s.r.o, Liberec při obrábění litiny ČSN 422425 (EN - GJL – 250).

Na obou druzích břitových destiček bylo měřeno opotřebení v závislosti na čase pro tři řady řezných rychlostí. Opotřebení bylo měřeno na třech břitech pro každý druh destiček. Zpracováním naměřených hodnot byly určeny grafické závislosti $VB = f(t)$, $T = f(v_c)$, konstanty C_T , C_v a exponent m základního Taylorova vztahu pro oba druhy destiček.

Rozsah provedených měření byl omezen počtem obrobků, které byly pro vypracování této práce k dispozici. Proto lze jednoznačně doporučit pro ověření a zpřesnění získaných výsledků provedení dalších zkoušek trvanlivosti s destičkami AC 300G i AC 700G.

Výsledky této práce budou použity k porovnávání vlastností uvedených břitových destiček s destičkami jiných výrobců v rámci experimentů prováděných na KOM. Dále budou výsledky předány dodavatelské firmě F.I.S.M. – produktivní nástroje s.r.o, Liberec pro ověření údajů uváděných v katalogu výrobce těchto destiček a pro porovnání s konkurenčními výrobky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ECKSCHLAGER, K., HORSÁK, I., KODEJŠ, Z. *Vyhodnocování analytických výsledků a metod*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. 223 s.
- [2] HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB, 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
- [3] KREIBICH, V. *Teorie a technologie povrchových úprav*. 1. vyd. Praha: ES ČVUT, 1999. 89 s. ISBN 80-01-00696-4.
- [4] KVAPIL, R., PRŮŠEK, A. *Řezné nástroje – cvičení*. 1. vyd. Liberec: ES VŠST, 1989. 241 s. ISBN 80-7083-019-0.
- [5] KVASNIČKA, I., SLAVÍK, V., ŠTAJNOCHR, L. *Obráběcí nástroje*. 1. vyd. Praha: ES ČVUT, 1998. 98 s. ISBN 80-01-01755-9.
- [6] MÁDL, J., KVASNIČKA, I. *Optimalizace obráběcího procesu*. 1. vyd. Praha: ES ČVUT, 1998. 168 s. ISBN 80-01-01864-6.
- [7] MOUKA, E., aj. *Teorie obrábění*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1985. 149 s.
- [8] PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1971. 198 s.
- [9] VIGNER, M., PŘIKRYL, K. *Obrábění*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 808 s.
- [10] VOBORNÍK, L. *Zkoušky oxidické a směsné řezné keramiky. [Diplomová práce]*. TU Liberec, 2003. 79 s.
- [11] HOLUBÁŘ, P., JÍLEK, M., RŮŽIČKA, M. Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření. *MM Průmyslové spektrum*. Září 2004, č. 9. s. 106 – 109. ISSN 1212-2572.
- [12] HOUDEK, J., KOUŘIL, K. Opotřebení břitu nástrojů ze slinutých karbidů, 1. část. *MM Průmyslové spektrum*. Prosinec 2004, č. 12. s. 20 – 21. ISSN 1212-2572.
- [13] HOUDEK, J., KOUŘIL, K. Opotřebení břitu nástrojů ze slinutých karbidů, 2. část. *MM Průmyslové spektrum*. Únor 2005, č. 1, 2. s. 71 – 73. ISSN 1212-2572.
- [14] HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. *MM Průmyslové spektrum, speciální vydání*. Září 2004, s. 84 – 96. ISSN 1212-2572.
- [15] KOCMAN, K., KOCMANOVÁ, A., PROKOP, J. Ekologické a technologické aspekty HSC obrábění. *MM Průmyslové spektrum*. Duben 2000, č. 4. s. 47 – 48. ISSN 1212-2572.
- [16] AB SANDVIK COROMANT, Sandiviken: Příručka obrábění. [1997]. 918s.
- [17] SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL: Hardmetal turning tools. [2004].
- [18] SHM, s. r. o. *Průvodce vrstvami SHM*. Dostupné na: <http://www.shm-cz.cz/cz/html/pruvodcevrstvami.html>.

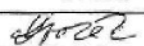
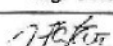
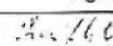
SEZNAM PŘÍLOH

Označení	Název	Počet stran	Počet obrázků	Počet tabulek
Příloha I.	Výkres vloženého válce	1	1	---
Příloha II.	Materiálový list vloženého válce	1	1	---
Příloha III.	Tvrdosti vložených válců	1	---	1
Příloha IV.	Průměry vložených válců	2	---	2
Příloha V.	Tabelované hodnoty pro výpočet destičky AC 700G	2	---	4
Příloha VI.	Grafické závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ pro destičku AC 300G	1	2	---
Příloha VII.	Grafické závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ pro destičku AC 700G	2	3	---
Příloha VIII.	Fotografie opotřebení vybraných břitů destiček AC 300G, AC 700G	2	4	---
Příloha IX.	Krátkodobé zkoušky za „extrémních“ podmínek	2	2	---

Příloha I.

Obr. P.I.1. Výkres vloženého válce

Příloha II.

AGS JČIN a.s.		MATERIÁLOVÝ LIST ODLITKU VV						č. 605/130	
Název odlitku : vložený válec , odstředivě litý do pískové formy								Označení : 	
Číslo výkresu odlitku : 605-130-10				Č. v. součásti : 123605200000					
Skupina : 34 . 30 . 12				Odběratel : NORTON DIAS					
Materiál : ČSN 42 24 25 legov.			Kód: Š 25/B		Chemické složení :				
C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Cu + Ni		
3,0 - 3,5	1,6 - 2,4	0,6 - 0,9	max. 0,08	0,3 - 0,5	0,2 - 0,5	0,25 - 0,5	max. 0,55		
PEVNOST V TAHU:		250 MPa minim .		Zkušební tyče podle ČSN 420330 z těles průměru 30 mm oddělené litých do pískové formy					
TVRDOST V HBS :		230 - 280		Brinellova zkouška HBS 10/3000 dle ČSN ISO 6506 na těle odlitku v oblasti pracovní části vložky na 3 místech v jedné rovině po 120°					
Vyhodnocení struktury podle ČSN 42 0461, mikrostruktura grafitu dle ČSN EN ISO 945 Struktura pracovní plochy po honování do hloubky 2 % průměru. (u průměru menších než 100 mm minimálně 2 mm)									
Grafit		lupinkový I A , B velikost 4 , 5 (3 ojedíněle)							
Perlit		lamelární P 1 Pd 0,5 Pd 1,- Pd 0,3 přípustné							
Steadit		tvoří nesouvislé až souvislé sítoví Fr 2 - Fr 3							
Ferit		povoleno do 5 %							
Cementit		nesmí být volně přítomen							
Nepropustnost		Vložené válce musejí být naprosto nepropustné při zkoušce tlakem po celé délce vložky 1,1 - 1,3 MPa po dobu 5 min. petrolejem.							
Pro odlitek vloženého válce platí ČSN 09 3131 včetně norem v ní uvedených.									
Poznámka :									
PŘEVZAL				VYJÁDRĚNÍ ZÁKAZNÍKA					
	DNE	PODPIS							
VO - SLV									
ŘKJ - SLV									
TECHNOLOG	DNE	METALURG	DNE	VEDOUCÍ TPUV SLV	DNE	KOPIE č.			
Dvořák		ing. Šafář		ing. Zmátlík	25 01				
	24.1.07		29.01.07		2007				

Obr. P.II.1. Materiálový list vloženého válce

Příloha III.

Tab. P.III.1. Tvrdosti vložených válců

Vzorek/válec číslo	Průměr válce D [mm]	Tloušťka stěny t [mm]	Tvrdost – číslo měření [HB]			Tvrdost - průměr [HB]	Skupina tvrdosti I.< 270HB >II.
			I.	II.	III.		
1.	152,3	10,0	260	262	264	262	I.
2.	154,5	11,5	285	278	272	278	II.
3.	154,3	10,5	260	260	263	261	I.
4.	150	9,0	272	268	268	270	II.
5.	150	8,6	272	263	268	268	I.
6.	152,8	10,3	278	276	280	278	II.
7.	154,7	10,7	273	278	272	274	II.
8.	153	10,5	272	278	274	275	II.
9.	153,8	10,5	260	260	263	261	I.
10.	153,7	11,0	272	274	266	271	II.
11.	156,8	12,0	274	274	276	275	II.
12.	153,5	10,2	266	263	271	266	I.
13.	159	13,5	282	278	275	278	II.
14.	153	10,5	272	275	278	275	II.
15.	159,1	13,5	255	255	260	257	I.
16.	158,2	12,5	268	268	267	268	I.
17.	157,6	12,3	282	280	282	282	II.
18.	152,3	9,7	257	260	266	261	I.
19.	156,5	11,6	284	278	272	278	II.
20.	158,6	13,8	263	278	278	273	II.
21.	157	12,3	257	260	260	259	I.
22.	152,2	9,7	260	266	263	263	I.
23.	158	12,3	257	290	292	280	II.
24.	158	12,8	280	285	285	283	II.
25.	152,4	10,0	266	267	262	265	I.
26.	158,7	12,6	266	266	272	268	I.
27.	156,5	12,1	258	278	272	269	I.
28.	152,9	10,2	278	273	266	278	II.
29.	156,6	12,1	260	258	260	260	I.
30.	157,8	12,7	260	266	263	263	I.

Příloha IV.

Tab. P.IV.1. Průměry obrobků, destička AC 300G

AC 300G					
Břit č. 1		Břit č. 2		Břit č. 3	
V _{1teor}		V _{2teor}		V _{3teor}	
Válec číslo	Průměr válce D _p [mm]	Válec číslo	Průměr válce D _p [mm]	Válec číslo	Průměr válce D _p [mm]
16	158,0	24	150,0	23	149,2
16	158,0	24	150,0	23	149,2
16	158,0	24	150,0	23	145,2
16	158,0	23	158,0	23	145,2
16	158,0	23	158,0	30	153,8
16	154,0	23	154,0	30	153,8
16	154,0	23	150,0	30	149,8
16	150,0	23	146,0	30	149,8
26	158,7	24	157,8	30	149,8
26	154,7	24	153,8	30	145,8
26	150,7				
26	146,7				
24	158,0				
24	154,0				

Tab. P.IV.2. Průměry obrobků, destička AC 700G

AC 700G					
Břit č. 1		Břit č. 2		Břit č. 3	
V _{1teor}		V _{2teor}		V _{3teor}	
Válec číslo	Průměr válce D _p [mm]	Válec číslo	Průměr válce D _p [mm]	Válec číslo	Průměr válce D _p [mm]
13	159,0	2	156,5	19	158,0
13	159,0	2	156,5	19	158,0
13	159,0	2	152,5	19	158,0
13	159,0	2	152,5	19	154,0
13	155,0	2	148,5	19	154,0
13	155,0	2	154,0	19	150,0
13	151,0	7	157,0	19	150,0
13	147,0	7	153,0	19	150,0
17	157,6	7	149,0	15	149,8
17	153,6	25	152,4	15	156,0
17	149,6	25	148,4	15	152,0
17	149,6	25	148,4	15	148,0
8	158,3				
8	154,3				
8	150,3				
8	146,3				
10	158,7				
10	154,7				
10	150,7				
10	146,7				
10	148,0				
10	145,8				

Příloha V.

Tab. P.V.1. Interval spolehlivosti pro rozšířené pásmo řezných rychlostí č.1 – AC 700G

v_c [m/min]	X_i	Y_i	$L_1 (-)$	$L_2 (+)$
250,0	2,39794	1,735139	1,410543	2,059736
282,44	2,450927	1,566661	1,325582	1,807739
300,0	2,477121	1,483371	1,278118	1,688624
354,58	2,549724	1,252519	1,099933	1,405104
400,0	2,60206	1,086109	0,904677	1,267541
445,92	2,649263	0,936019	0,694579	1,17746
500,0	2,69897	0,777969	0,458405	1,097534
550,0	2,740363	0,646355	0,256471	1,03624
600,0	2,778151	0,526201	0,069933	0,982469
650,0	2,812913	0,41567	-0,1028	0,934137
700,0	2,845098	0,313334	-0,26337	0,890042
750,0	2,875061	0,218061	-0,41328	0,849399
800,0	2,90309	0,12894	-0,55377	0,81165

Tab. P.V.2. Interval spolehlivosti pro rozšířené pásmo řezných rychlostí č.2 – AC 700G

v_c [m/min]	Y_i	$L_1 (-)$	$L_2 (+)$
250,0	54,342449	25,736101	114,7455
282,44	36,868946	21,163239	64,230207
300,0	30,434813	18,972202	48,822894
354,59	17,886233	12,58732	25,415841
400,0	12,192964	8,0292948	18,515744
445,93	8,6301646	4,9496973	15,047333
500,0	5,9974889	2,8734574	12,517977
550,0	4,4295055	1,8049723	10,87026
600,0	3,3589294	1,1747161	9,604369
650,0	2,6041715	0,7892275	8,592844
700,0	2,0574703	0,5452868	7,7632243
750,0	1,652194	0,3861208	7,069666
800,0	1,345673	0,2794017	6,4811205

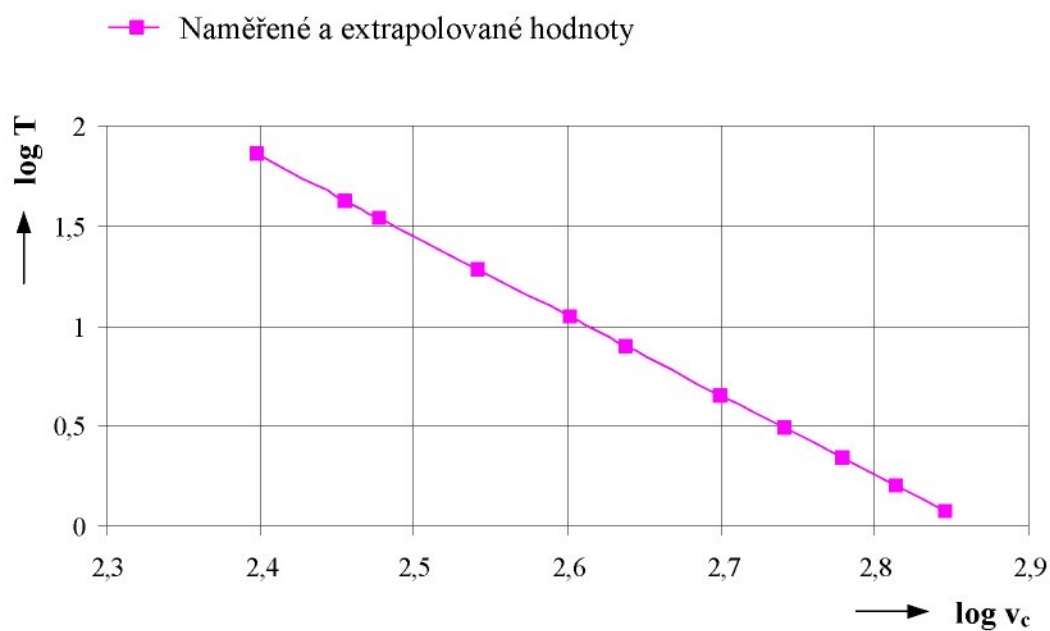
Tab. P.V.3.. Schéma pro výpočet regresních koeficientů – AC 700G

Břít č.	v_c [m/min]	T [min]	$x = \log v_c$	$y = \log T$	x^2	xy
1	282,96	37,6	2,451725	1,575188	6,010956	3,861927
2	353,92	17,2	2,548905	1,235528	6,496917	3,149245
3	445,69	8,8	2,649033	0,944483	7,017375	2,501966
			$\Sigma x =$	$\Sigma y =$	$\Sigma x^2 =$	$\Sigma xy =$
			7,649663	3,755199	19,525248	9,513138
			$(\Sigma x)^2 =$			
			58,517345			

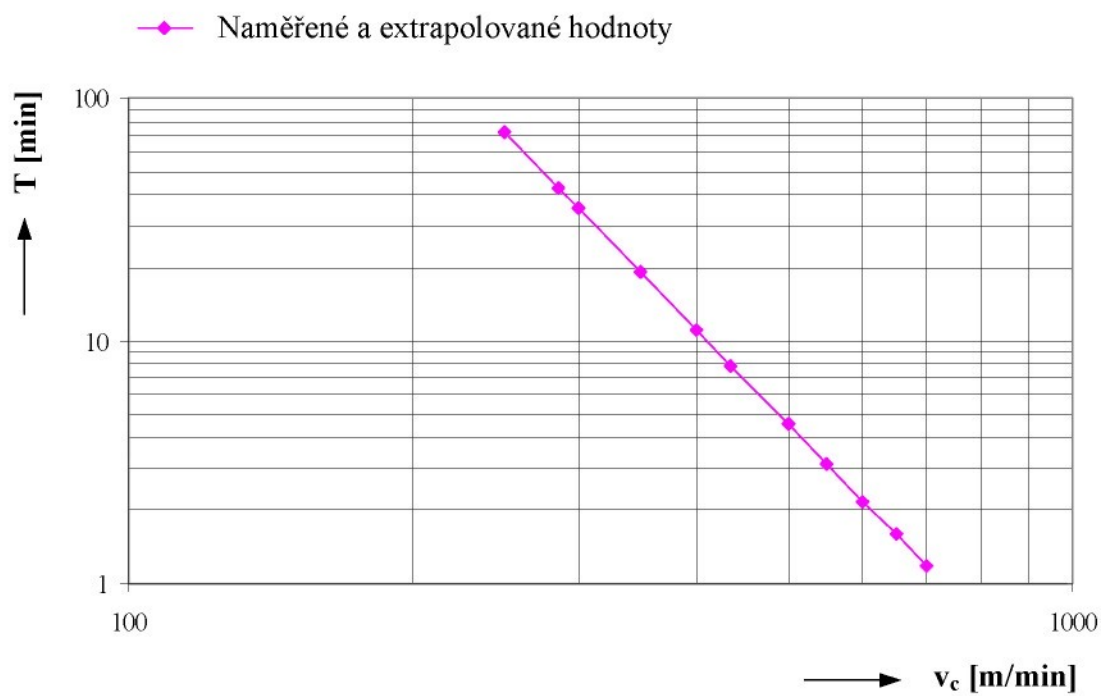
Tab. P.V.4. Schéma pro výpočet směrodatné odchylky $s_{y,x}$ – AC 700G

i	Y_i	$y_i - Y_i$	$(y_i - Y_i)^2$
1	1,5653714	0,009816	9,636E-05
2	1,2548724	-0,019344	0,0003742
3	0,9349552	0,009527	9,077E-05
			$\Sigma (y_i - Y_i)^2 =$
			0,0005613

Příloha VI.

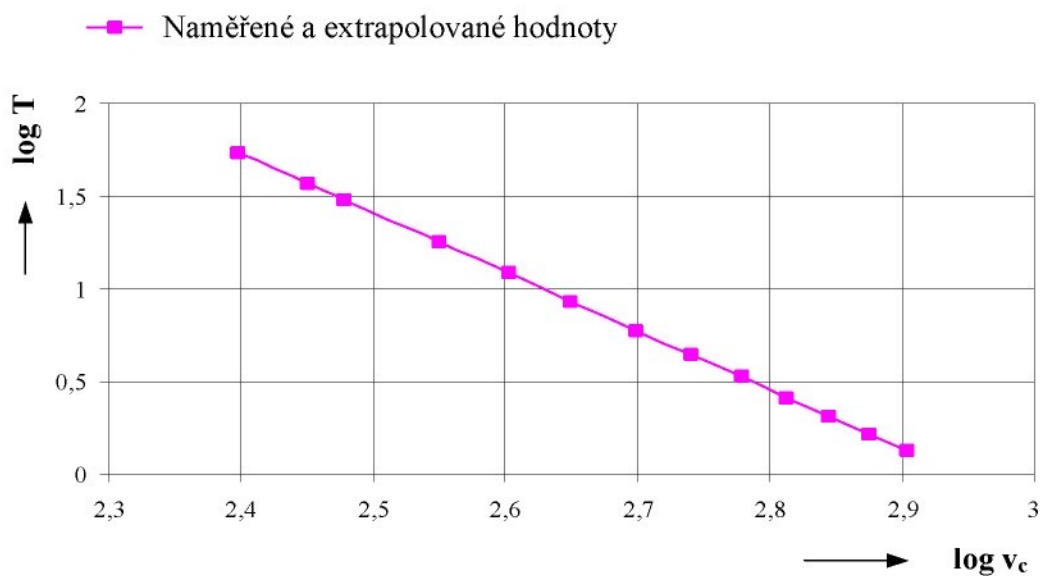


Obr. P.VI.1. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ pro rozšířené pásmo řezných rychlostí

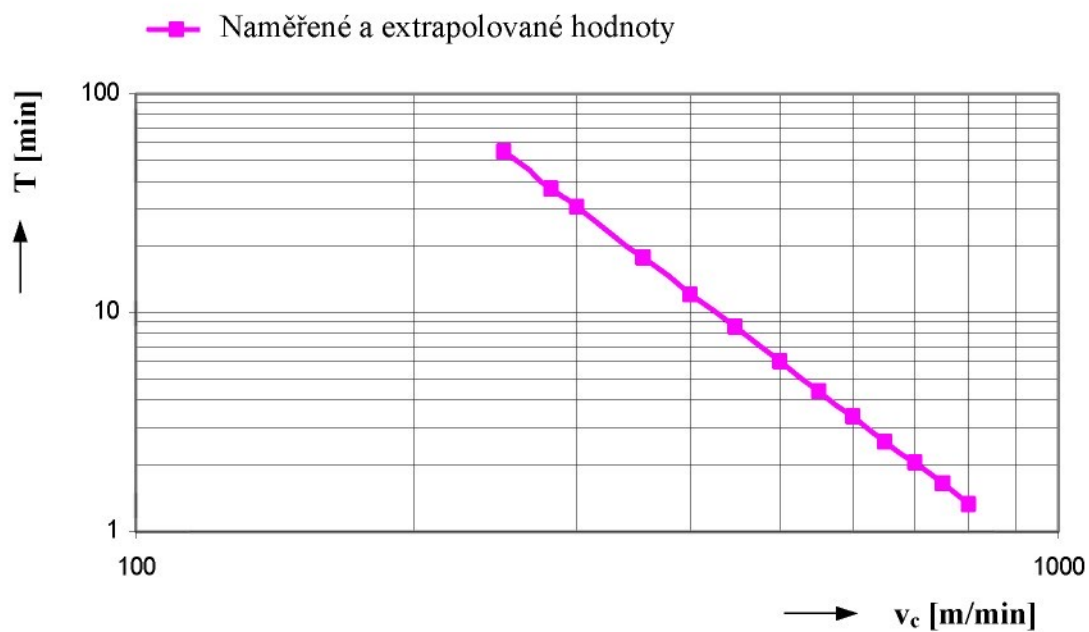


Obr. P.VI.2. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích pro rozšířené pásmo řezných rychlostí

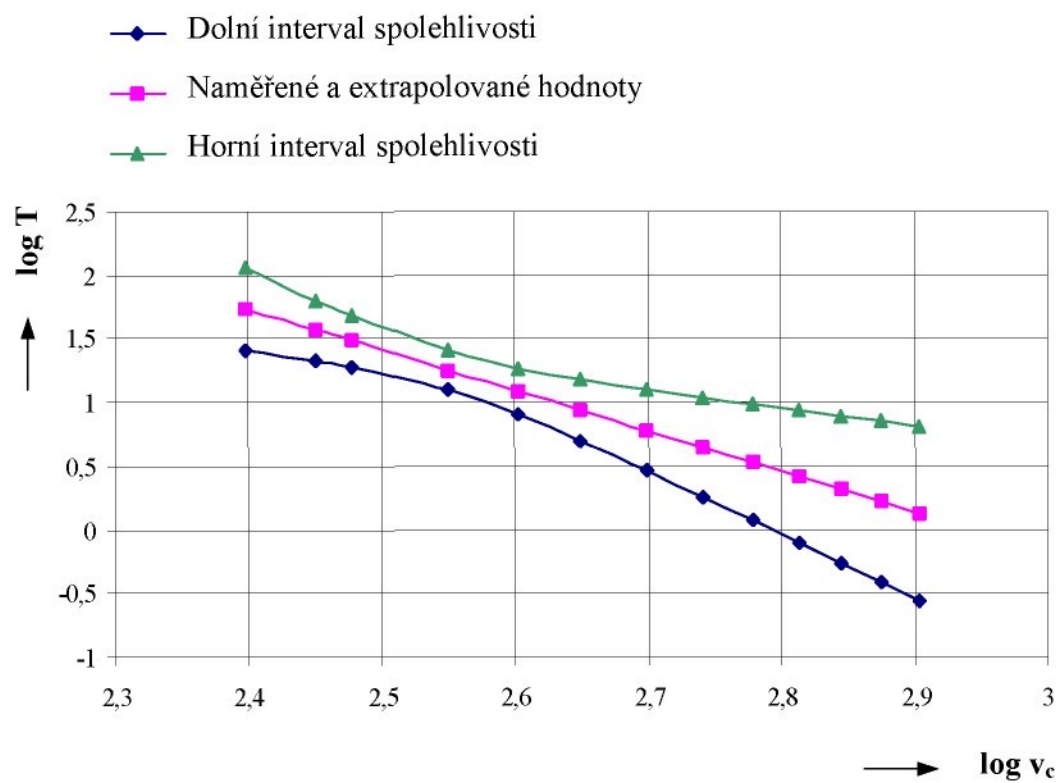
Příloha VII.



Obr. P.VII.1. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ pro rozšířené pásmo řezných rychlostí



Obr. P.VII.2. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích pro rozšířené pásmo řezných rychlostí



Obr. P.VII.3. Závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$ s vyznačeným pásem spolehlivosti lineární regresní závislosti

Příloha VIII.



Obr. P.VIII.1. Opotřebení destičky AC 300G – břit č.2



Obr. P.VIII.2. Opotřebení destičky AC 300G – břit č.3



Obr. P.VIII.3. Opotřebení destičky AC 700G – břit č.1



Obr. P.VIII.4. Opotřebení destičky AC 700G – břit č.2

Příloha IX.

Krátkodobé zkoušky za „extrémních“ podmínek

Cílem těchto zkoušek bylo ověření vlivu „extrémních“ řezných podmínek na opotřebení břitů. Za „extrémní“ byly uvažovány následující podmínky:

řezná rychlost:	$v_c = 350$ m/min
posuv:	$f = 0,05$ mm/ot
hloubka řezu:	$a_p = 8$ mm
doba zkoušky:	4 min

pozn.: Za minimální lze uvažovat z praktického hlediska hodnotu posuvu, která je $1 \div 2 \cdot 10^{-2}$ mm/ot. Tato velikost posuvu odpovídá $\approx 2/3$ poloměru ostří nástroje ρ . Při tomto posuvu přestává být obráběný materiál odřezáván a je vtlačován pod hřbet nástroje.

Průběh zkoušky:

Obráběním s vysokou hloubkou řezu byla zvětšena kontaktní plocha mezi řezným nástrojem a obrobkem a tím byl zajištěn předpoklad pro zvýšení teploty v zóně řezání vlivem větší třecí plochy [16]. Po půl minutě od začátku zkoušky se začala tříska odcházející z místa řezu červeně barvit (viz. obr. P.IX.1.) a následně bylo možné pozorovat přeměnu „klasické třísky“ vznikající při konvenčních způsobech obrábění v třísku tavící se odcházející z místa řezu ve formě „taveniny“ (viz. obr. P.IX.2.). Za těchto podmínek probíhala zkouška až do svého zakončení (4 minuty). Tato tříska ve formě „taveniny“ je důkazem, že při zkoušce byla v zóně řezání překročena teplota A1 z rovnovážného diagramu železo – grafit.

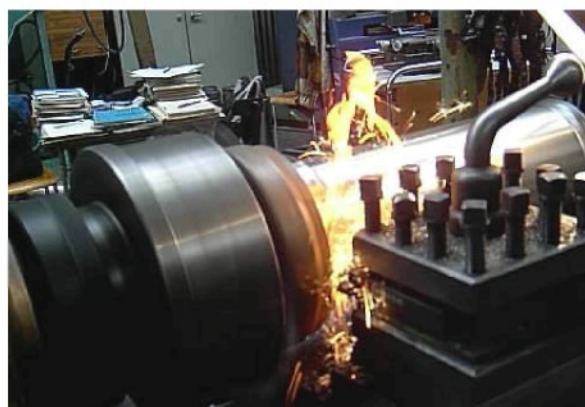
Po provedení zkoušky byla změřena poloviční míra opotřebení proti opotřebení, které bylo naměřeno za stejný čas při provádění dlouhodobých zkoušek trvanlivosti.

Průběh a výsledky zkoušky lze vysvětlit následovně [15]:

Při podmínkách blízkých HSC obrábění se část vzniklého tepla odvádí třískou, její teplota se blíží tavící teplotě obráběného materiálu. Při určité řezné rychlosti se náhle změní fyzikální a chemické vlastnosti třísky a transformace obráběného materiálu v třísku probíhá v rovině stříhu za vysoké teploty, která způsobí její podstatné změknutí a střední součinitel tření se výrazně zmenší. Tím je značně eliminován vliv normálové složky řezné síly na čele nástroje, poklesne celkový řezný odpor a tedy i třecí složka řezné síly. Důsledkem toho se zmenší intenzita opotřebení nástroje a úhel střížné roviny se zvětší při značně zmenšeném úhlu tření.



Obr. P.IX.1. Tříška na čele nástroje



Obr. P.IX.2. Tvorba „tavící se“ třísky

